

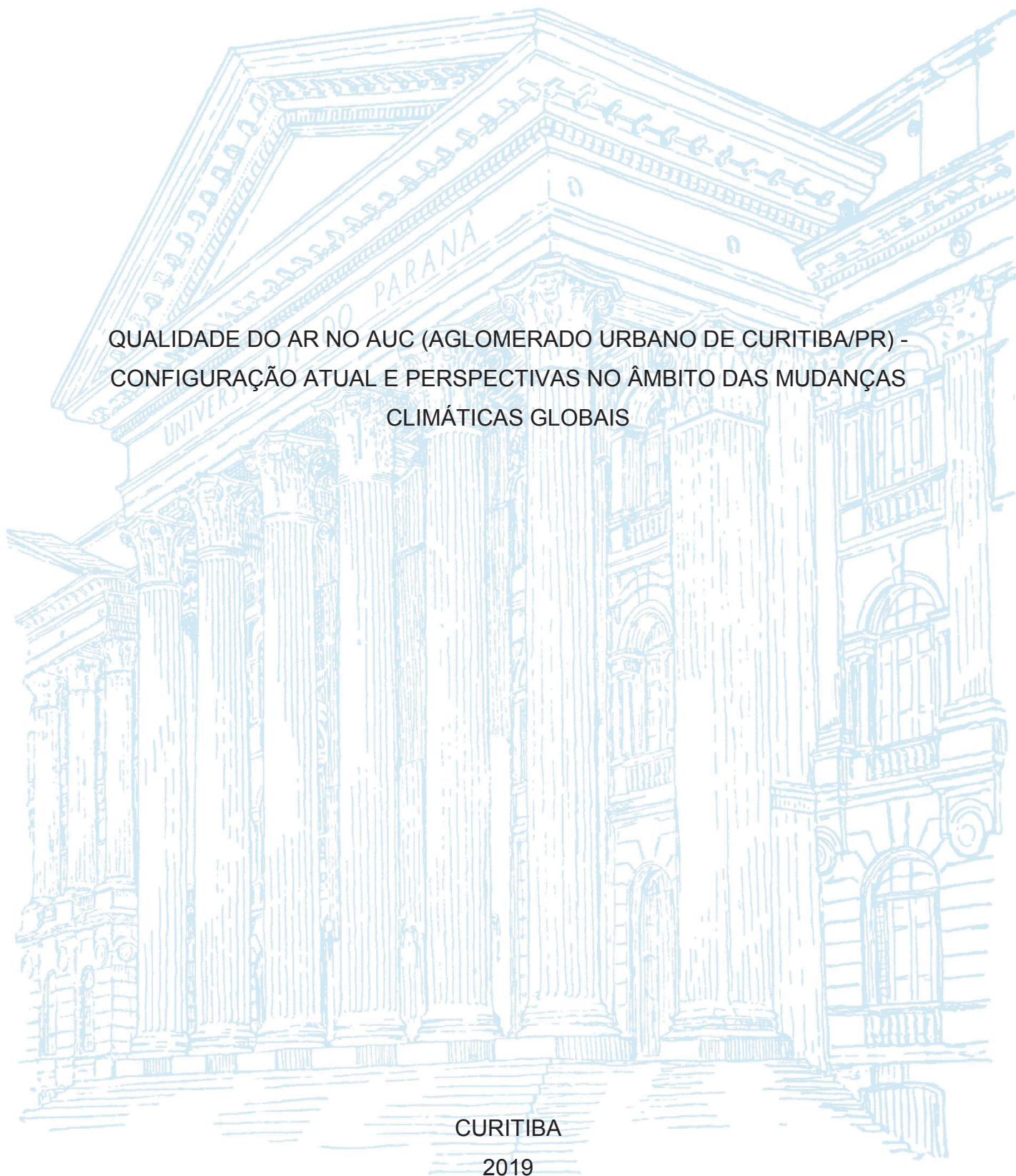
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FRANCISCO JABLINSKI CASTELHANO

QUALIDADE DO AR NO AUC (AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA/PR) -  
CONFIGURAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NO ÂMBITO DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS GLOBAIS

CURITIBA

2019



FRANCISCO JABLINSKI CASTELHANO

QUALIDADE DO AR NO AUC (AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA/PR) -  
CONFIGURAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NO ÂMBITO DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS GLOBAIS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação  
em Geografia, Setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná, como  
requisito parcial à obtenção do título de Doutor  
em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis  
Mendonça

CURITIBA  
2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

M528i    Castelhana, Francisco Jablinski  
          Qualidade do ar no AUC (aglomerado urbano de Curitiba/PR) -  
          configuração atual e perspectivas no âmbito das mudanças climáticas  
          globais [Recurso eletrônico] / Francisco Jablinski Castelhana –  
          Curitiba, 2019.

          Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra,  
          Programa de Pós-graduação em Geografia.

          Orientador: Francisco de Assis Mendonça

          1. Qualidade do ar. 2. Clima Urbano. I. Universidade Federal do  
          Paraná. II. Mendonça, Francisco de Assis. III. Título.

CDD: 363.739

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **FRANCISCO JABLINSKI CASTELHANO**, intitulada: **QUALIDADE DO AR NO AUC (AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA/PR) - CONFIGURAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NO ÂMBITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de Doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 22 de Março de 2019.

  
FRANCISCO DE ASSIS MENDONÇA  
Presidente da Banca Examinadora

  
HARRY ALBERTO BOLLMANN  
Avaliador Externo (PUC/PR)

  
HUGO ROMERO  
Avaliador Interno (UAC)

  
ERIKA PEREIRA FELIX  
Avaliador Externo (UTFPR)

  
CHARLES APARECIDO DA SILVA  
Avaliador Externo (UFGD)



Aos meus Pais

**Ana Luiza e Itamar**

por nunca falharem como pais,  
constante e irrestrito apoio  
e pelos alicerces que mantereí a vida toda

À minha esposa

**Mariana Andreotti Dias**

Pela força, exemplo, carinho  
e sonhos compartilhados

## AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma pesquisa não é e nem deve ser uma tarefa individual. O caminho percorrido só chega ao ponto final graças ao apoio de amigos, colegas e instituições que colaboraram direta ou indiretamente no cumprimento destes objetivos.

Agradeço primeiramente a UFPR, ao Setor de Ciências de Terra e ao Departamento de Geografia, instituição que me fez muito feliz e orgulhoso ao longo destes anos, possibilitando um crescimento pessoal e intelectual que não esperava. Entrar nesta Universidade e no curso de Geografia foi uma das mais sábias decisões que tomei.

Agradeço a CAPES e ao CNPQ pelos anos de bolsa, tanto nas modalidades de Iniciação Científica quanto de Mestrado, Doutorado e principalmente do programa Ciências Sem Fronteiras.

Meu primeiro contato com a temática desta tese foi justamente através do intercâmbio tão bem vivido e propiciado pelo Governo Federal, à época durante o primeiro mandato de Dilma Rousseff, que muito investiu no fomento à ciência. Foi este Programa, o Ciência Sem Fronteiras, que me instigou certa consciência social do papel do pesquisador e me fez, verdadeiramente, correr atrás para retribuir o investimento.

Agradeço profundamente ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Mendonça por todo o apoio, oportunidade, amizade e principalmente confiança ao longo destes quase nove anos de orientação envolvendo graduação e pós.

Igualmente agradeço ao Prof. Dr. Wilson Flávio Roseghini por sua disposição, vontade, colaboração e amizade, acompanhando sempre com muito interesse o desenvolvimento das etapas deste trabalho.

Ao meu irmão, melhor amigo e companheiro Pedro, onde ce vai eu também vou. As discussões em frente ao PES propiciaram muita reflexão e argumentação, mostrando-me que a cidade é um fenômeno muito mais complexo do que aparenta.

Aos meus grandes *bróderes do surfe*, os melhores amigos que um cara pode ter, Caio “Tragédia”, Eduardo “Brasília”, Felipe “Fils”, João Francisco “Suvinil”, Leandrão, Leo, Marcão e Thiaguinho.

As instituições IAP, Secretaria Municipal de Meio Ambiente, SIMEPAR, INMET, IPPUC e URBS, pelo interesse na pesquisa e fornecimento de dados que a propiciaram.

Aos colegas do projeto PARCUR e do SMHI que tanto ajudaram e tão bem me receberam para o estágio na Suécia, Jorge Humberto, Lars Gidhagen, Erika Felix, Patricia Krecl, Cecilia Bennet e David Segerson.

À todos os amigos do LABOCLIMA, que constantemente auxiliaram na elaboração desta tese e acompanharam todo o seu desenvolvimento, em especial Thiago Kich Fogaça, Wiviany Araujo, Gabriela Pinheiro e Kauan Fonseca.

Agradeço por fim à Universidad Catolica de Ávila e, em especial aos professores, Maria Rosa Perez e Pedro Manuel Diaz (*in memoriam*) pela introdução ao tema, me fazendo enxergar novas possibilidades na geografia e nas ciências ambientais.

*And if the dam breaks open many years too soon  
And if there is no room upon the hill  
And if your head explodes with dark forebodings too  
I'll see you on the dark side of the moon*

*(Waters, Roger. Brain Damage. In: Dark Side of the Moon)*



## RESUMO

A proposta deste trabalho é analisar geograficamente a qualidade do ar no Aglomerado Urbano de Curitiba, capital do Estado do Paraná, região Sul do Brasil. Para tanto, foi elaborada uma metodologia com base no Sistema Ambiental Urbano de Mendonça (2004) que promove uma visão sistêmica do fenômeno da qualidade do Ar. A aplicação desta metodologia no presente estudo aponta para a produção do espaço urbano como um elemento determinante da dinâmica dos poluentes atmosféricos, enquanto que, os aspectos climáticos surgem como elementos que potencializam ou condicionam a dispersão e/ou acúmulo de poluentes. Em contexto, a análise da qualidade do ar de Curitiba iniciou-se por uma análise em meso escala da dispersão espacial de poluentes, utilizando-se de dados secundários e de modelos de dispersão de PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> com base nas fontes de emissão fixas (indústrias principalmente) e coletas de campo de NO<sub>2</sub> e NO em locais com características urbanas específicas. Os locais com piores níveis de poluição, registrados na cidade, estão relacionados à proximidade com os centros industriais, regiões de alto tráfego de veículos e verticalizadas. A oscilação temporal dos poluentes expôs uma clara relação entre estes e a cidade, revelando valores mais baixos aos finais de semana, momentos em que a circulação de veículos é menor. Tal análise evidenciou a relação entre a distribuição espacial dos poluentes e o planejamento e a produção do espaço urbano do Aglomerado Urbano de Curitiba. Na sequência partiu-se para uma análise estatística da relação clima e qualidade do ar, utilizando-se de séries históricas de dez anos de PTS, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, oriundas de cinco estações de monitoramento da qualidade do ar mantidas pelo IAP (Instituto Ambiental do Paraná). Nesta fase pôde-se analisar quais os fatores meteorológicos mais exercem influência sobre os poluentes, concluindo que a influência climática se dá, sobretudo, com a chuva, ventos e temperatura, em específico para o poluente O<sub>3</sub>. Observando o papel do clima como condicionante às situações de qualidade do ar e pensando nos cenários de mudanças climáticas globais, complementou-se a dita análise por meio de um estudo de tendências para índices climáticos, em conjunto à uma revisão bibliográfica sobre os cenários climáticos projetados para a região de Curitiba. A partir destes cenários, foram calculadas tendências para os poluentes em cada estação analisada da capital, possibilitando a criação de prospecções para a qualidade do ar, levando em conta esta relação com o clima. Dessa forma, conclui-se que o ozônio troposférico é o poluente que mais sofre alterações em seus volumes e que, portanto, deve ser o foco de futuras ações. A metodologia proposta mostrou-se adequada para o estudo dos poluentes atmosféricos, sua análise sistêmica possibilitou uma abordagem integrada dos vários elementos que atuam sobre a má qualidade do ar na capital paranaense, sejam eles, elementos políticos, sociais, econômicos, culturais e ambientais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Curitiba. Qualidade do Ar. Clima Urbano. Abordagem Geográfica. Sistema Poluição do Ar.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the air quality in the Urban Agglomerate of Curitiba, capital of the state of Paraná, southern Brazil. For this, a methodology based on Mendonça's Urban Environmental System (2004b) was developed to promote a systemic view of the air quality phenomenon. The application of this methodology in this study points to the production of urban space as the determining element for the dynamics of air pollutants while climatic aspects appear as the elements that potentiate or condition the dispersion and / or accumulation of pollutants. The air quality analysis of Curitiba was initiated by the elaboration of dispersion models of PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> based on fixed emission sources (mainly industries) and NO<sub>2</sub> and NO field collections at sites with specific urban characteristics. The places with the worst levels of pollution registered in the city are related to the proximity to the industrial centers, regions of high traffic of vehicles and verticalized. The temporal oscillation of the pollutants also revealed a clear relationship between the pollutants and the city, always showing lower values at the end of the week, when the circulation of vehicles decreases. This analysis triggered the relationship between the spatial distribution of the pollutants and the planning and production of the urban space of the Urban Agglomerate of Curitiba. A statistical analysis of the climate and air quality relationship was carried out using 10-year historical series of PTS, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> from five air quality monitoring stations maintained by the Environmental Institute of Paraná). In this phase, it is possible to analyze which meteorological factors influence the pollutants most, concluding that the climatic influence occurs, especially with rain and winds, and with a specific temperature for the pollutant O<sub>3</sub>. Observing the role of climate as conditioning air quality conditions and thinking about global climate change scenarios, this analysis was supplemented by a trend study for climate indices in conjunction with a literature review on the climate scenarios projected for the region of Curitiba. From these scenarios, trends were calculated for the pollutants at each station analyzed in Curitiba, making possible the creation of air quality surveys in Curitiba, taking into account this relationship with the climate. It is concluded that tropospheric ozone is the pollutant that must suffer more changes in its volumes and that, therefore, should be the focus of future actions. The proposed methodology proved adequate for the study of atmospheric pollutants. Its systemic analysis enabled an integrated geographic approach of the various elements that act on poor air quality in the Parana state capital, be they political, social, economic, cultural and environmental elements.

**KEYWORDS:** Curitiba. Air quality. Urban Climate. Geographic approach. Air pollution system.

## LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1 – AUC - Localização das Estações da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar. ....	26
FIGURA 2 - Etapas do Método Hipotético-dedutivo. ....	31
FIGURA 3 - Fluxograma Geral desta Pesquisa.....	32
FIGURA 4 - Aspectos Abordados por Trabalhos na Área de Qualidade do Ar no Âmbito da Geografia no Brasil.....	36
FIGURA 5– Escalas do Clima Urbano por Tim Oke.....	37
FIGURA 6- Estrutura do Processo de Poluição Atmosférica.....	39
FIGURA 7- O Sistema Poluição Atmosférica do AUC – Aglomerado Urbano de Curitiba/PR.....	42
FIGURA 8 - Tipos de Poluentes do Ar conforme diferentes fontes. ....	43
FIGURA 9- Eixo Estrutural de Curitiba .....	51
FIGURA 10- Eixos Estruturais de Curitiba .....	52
FIGURA 11 - Região Metropolitana de Curitiba - Expansão da Mancha Urbana, 1986-2009 .....	54
FIGURA 12 – Expansão Urbana da Metrópole curitibana ao fim dos anos 2000 .....	55
FIGURA 13– Modelo de tráfego de Veículos para Curitiba.....	57
FIGURA 14– Curitiba e entorno - Localização das Fontes Fixas de Emissão de Poluentes .....	59
FIGURA 15- Curitiba/PR - Inversão Térmica.....	61
FIGURA 16- Fases dos transportes de Poluentes pela atmosfera.....	62
FIGURA 17- Esquema em corte de um <i>Canyon</i> Urbano.....	66
FIGURA 18 – Cobertura Vegetal em Curitiba – 1984-2004 .....	67
FIGURA 19: Brasil: Massas de Ar atuantes. ....	68
FIGURA 20 - Curitiba: Normais Climatológicas 1975 – 2015.....	69
FIGURA 21 - Curitiba: Ventos Predominantes 2004 – 2015. ....	70
FIGURA 22 - Curitiba: Ventos por Estação 2004-2015.....	71
FIGURA 23 – Curitiba – Verticalização dos Eixos Estruturais e a formação de Canyons Urbanos.....	73
FIGURA 24- Avenida Sete de Setembro. Exemplo de <i>canyon</i> urbano. ....	74
FIGURA 25 – Crescimento da Frota de Veículos no Paraná (2008-2017) e Variação do P.I.B. Nacional (2008 – 2017). ....	76

FIGURA 26- AUC/Parcial - Localização das Estações Utilizadas neste Estudo .....	88
FIGURA 27- Curitiba / Colombo: Área urbana limítrofe e localização da Estação Santa Cândida.....	89
FIGURA 28– Curitiba: Área urbana central e localização da Estação Praça Ouvidor Pardinho. ....	90
FIGURA 29- Curitiba: Área urbana periférica e localização da Estação Boqueirão.....	91
FIGURA 30 – Araucária: Área industrial e Estação CSN .....	92
FIGURA 31- Araucária: Área urbana periférica e Estação Assis.....	93
FIGURA 32 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por SO <sub>2</sub> .	94
FIGURA 33 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por PTS.	95
FIGURA 34 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por NO <sub>2</sub> .	96
FIGURA 35 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por O <sub>3</sub> ....	97
FIGURA 36– Pluma de Dispersão do Modelo Gaussiano .....	98
FIGURA 37– (A) Distância da Fonte Emissora x Dispersão Vertical; (B) Distância da Fonte Emissora x Dispersão Horizontal.....	99
FIGURA 38– AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário I.- 2013 a) NO <sub>x</sub> ; b) PM <sub>10</sub> ; c) SO <sub>2</sub> .....	103
FIGURA 39– AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário II.- 2013 a) NO <sub>x</sub> ; b) PM <sub>10</sub> ; c) SO <sub>2</sub> .....	105
FIGURA 40– AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário III - 2013 a) NO <sub>x</sub> ; b) PM <sub>10</sub> ; c) SO <sub>2</sub> .....	107
FIGURA 41 – AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário IV - 2013 a) NO <sub>x</sub> ; b) PM <sub>10</sub> ; c) SO <sub>2</sub> .....	109
FIGURA 42– Componentes do Amostrador Passivo Ogawa – Esquerda para Direita: Membrana reagente em destaque; Corpo plástico; Proteção lateral; Anel fixador; Tela protetora; Membrana Reagente; Tela protetora; Proteção externa vazada.....	111
FIGURA 43- AUC - Localização dos Amostradores Passivos Utilizados na Campanha de Dados Primários .....	111
FIGURA 44– Registros de Precipitação durante a Campanha de Monitoramento .....	114



FIGURA 45 – Velocidade e Direção do Vento em Curitiba na Primeira Campanha de Monitoramento (A) e Segunda Campanha de Monitoramento (B). .....	115
FIGURA 46– Temperatura Média Diária, Média do Período e Média Histórica durante o período de Monitoramento (29/07/2016 – 29/08/2016). ....	116
FIGURA 47– Concentrações de NO e NO <sub>2</sub> nos pontos de Coleta – Primeira Campanha.....	117
FIGURA 48 – AUC - Distribuição Espacial das Concentrações de NO e NO <sub>2</sub> nos pontos de Coleta – Primeira Campanha. 29-07 a 12-08-2016. ....	118
FIGURA 49– Concentrações de NO e NO <sub>2</sub> nos pontos de Coleta – Segunda Campanha.....	119
Figura 50– AUC - Distribuição Espacial das Concentrações de NO e NO <sub>2</sub> nos pontos de Coleta – Segunda Campanha. 15-08 a 29-08-2016. ....	121
FIGURA 51 – AUC – A poluição em Microescala do NO. ....	122
FIGURA 52 – AUC- A poluição em Microescala do NO <sub>2</sub> . ....	123
FIGURA 53- Fluxograma Metodológico: Elementos do Clima e Qualidade do Ar .....	125
FIGURA 54 – AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Boqueirão.....	127
FIGURA 55 - AUC - Serie Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Santa Cândida.....	128
FIGURA 56 - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Praça Ouvidor Pardinho .....	128
FIGURA 57 - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Assis. .....	129
FIGURA 58 - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação CSN. .....	129
FIGURA 59 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes- Estação Boqueirão..	130
FIGURA 60 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes- Estação Praça Ouvidor Pardinho.....	130
FIGURA 61 AUC - Oscilações Anuais dos poluentes– Estação Santa Cândida .....	131
FIGURA 62 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes - Estação CSN.....	132
FIGURA 63 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes- Estação Assis.....	132

FIGURA 64 – AUC - Oscilações Intra-anuais de NO <sub>2</sub> .....	133
FIGURA 65 - AUC - Oscilações Intra-anuais de SO <sub>2</sub> .....	134
FIGURA 66 - AUC - Oscilações Intra-anuais de O <sub>3</sub> .....	135
FIGURA 67 - AUC - Oscilações Intra-anuais de PTS.....	136
FIGURA 68 - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Boqueirão. 2005-2014.....	138
FIGURA 69 - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Praça Ouvidor Pardino. 2005-2014. ....	139
FIGURA 70 - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Santa Cândida. 2004-2015.....	141
Figura 71 - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação CSN. 2005-2014.....	142
FIGURA 72 - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Assis.2005-2014.....	144
FIGURA 73- AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Boqueirão. 2005-2014.....	146
FIGURA 74 - AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Pç Ouvidor Pardino. 2005-2014 .....	147
FIGURA 75 - AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Santa Cândida. 2005-2014.....	148
FIGURA 76 - AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação CSN. 2005-2014.....	149
FIGURA 77– AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Assis. 2005-2014.....	150
FIGURA 78 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação Boqueirão. 2005-2014.....	152
FIGURA 79 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação Praça Ouvidor Pardino. 2005-2014. ....	154
FIGURA 80 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação Santa Cândida.2005-2014.....	155
FIGURA 81 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação CSN.2005-2014.....	157
FIGURA 82 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação CSN. 2005-2015. ....	158

FIGURA 83 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Boqueirão. 2005-2014.....	160
FIGURA 84 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Praça Ouvidor Pardinho. 2005-2014 .....	161
FIGURA 85 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Santa Cândida. 2005-2014.....	162
FIGURA 86 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação CSN. 2005-2014.....	163
FIGURA 87- AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Assis. 2005-2014.....	165
FIGURA 88 – AUC - Tipos de Tempo x Ozônio – Outubro/2010 .....	167
FIGURA 89 - AUC - Tipos de Tempo e Dióxido de Enxofre – Abril/2011 .....	168
FIGURA 90 – AUC - Tipos de Tempo e Dióxido de Nitrogênio – Abril/2012 ..	170
FIGURA 91 – AUC - Tipos de Tempo e Partículas Totais em Suspensão – Julho/2012.....	172
FIGURA 92– Mudanças Climáticas no Brasil.....	180
FIGURA 93 – Síntese de Mudanças observadas na Classificação de Koppen no Brasil entre os anos de 1964-1989 e 1990-2015. – (1) Mudança para um clima mais quente; (2) Mudança para um clima mais úmido; (3) Mudança para um clima mais seco; (4) Mudança para um clima mais árido; (5) outro tipo de mudança; (6) sem mudança.....	182
FIGURA 94 – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao SO <sub>2</sub> ; A – Assis; B- Boqueirão; C- CSN; D- Praça Ouvidor Pardinho; E- Santa Cândida.....	188
FIGURA 95 – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao SO <sub>2</sub> .....	189
FIGURA 96 – AUC - Tendência de Thielsen aplicado ao PTS; A – Assis; B- Boqueirão; C- CSN; D- Praça Ouvidor Pardinho.....	189
FIGURA 97– AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao PTS.....	190
FIGURA 98 – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao NO <sub>2</sub> ; A – Assis; B- CSN; C- Praça Ouvidor Pardinho; D – Santa Cândida.....	191
FIGURA 99– AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao NO <sub>2</sub> .....	191
FIGURA 100 – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao O <sub>3</sub> – A – Assis; B- Boqueirão; C- CSN; D- Praça Ouvidor Pardinho; E – Santa Cândida.....	192
FIGURA 101 – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao O <sub>3</sub> .....	193
FIGURA 102 – AUC - Tendências de Theilsen nas Estações analisadas.....	194

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Principais Fontes de Poluição Atmosférica e seus Poluentes. ....	47
TABELA 2 – População Total e Crescimento Percentual da População de Curitiba. 1940 – 2010. ....	51
TABELA 3- Parâmetros Mínimos de Concentração de Poluentes Aceitáveis segundo a Legislação Norte-americana atual. ....	80
TABELA 4 - Parâmetros Mínimos de Concentração de Poluentes Aceitáveis segundo a Legislação Europeia atual. ....	81
TABELA 5- Parâmetros Mínimos de Concentração de Poluentes Aceitáveis segundo Legislação brasileira vigente ....	83
TABELA 6– AUC - Pontos de Coleta de dados de poluição do ar: Localização e Características relevantes. ....	112
TABELA 7– Períodos escolhidos para Aplicação da Análise Rítmica ....	127
TABELA 8- Categorias de Chuva Propostas. ....	145
TABELA 9– Índices de Variabilidade Climática Utilizados e os Poluentes afetados ....	177
TABELA 10 – AUC - Tendências observadas nos índices Climáticos calculados ....	184



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUC.....	Aglomerado Urbano de Curitiba
BPP.....	<i>Bivariate Polar Plots</i>
CIAR.....	Centro Industrial de Araucária
CIC.....	Cidade Industrial de Curitiba
CO.....	Monóxido de Carbono
EPA.....	<i>Environmental Protection Agency</i>
EEA.....	<i>European Environmental Agency</i>
ETCCDI.....	<i>Expert Team on Climate Change Detection and Indices</i>
IAP.....	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE.....	Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
INMET.....	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE.....	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC.....	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ITCG.....	Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná
NAAQS.....	<i>North American Air Quality Standards</i>
NEPA.....	<i>National environmental Policy Act</i>
NO <sub>x</sub> .....	Oxidos de Nitrogênio
NO.....	Monóxido de Nitrogênio
NO <sub>2</sub> .....	Dióxido de Nitrogênio
O <sub>3</sub> .....	Ozonio Troposférico
PBB.....	Partes por Bilhão
PBMC.....	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PM <sub>10</sub> .....	Material Particulado até 10µm
PM <sub>2.5</sub> .....	Material Particulado até 2,5µm
PND.....	Plano Nacional de Desenvolvimento
PTS.....	Partículas Totais em Suspensão
RCP.....	<i>Representative Concentrations Pathways</i>
REPAR.....	Refinaria Presidente Vargas
RMC.....	Região Metropolitana de Curitiba
SIMEPAR.....	Serviço Meteorológico do Paraná
SO <sub>2</sub> .....	Dioxido de Enxofre
SO <sub>4</sub> .....	Sulfato
UBL.....	<i>Urban Boundary Layer</i>

**UCL**.....*Urban Canopy Layer*

**VOC**.....*Volatile Organic Compound*

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>QUESTÕES NORTEADORAS .....</b>	<b>26</b>
<b>HIPÓTESE .....</b>	<b>27</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO I – PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS PARA UMA ABORDAGEM GEOGRÁFICA DA QUALIDADE DO AR NA CIDADE .....</b>	<b>31</b>
<b>I.1 <i>INPUTS</i> DETERMINANTES DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA” .....</b>	<b>46</b>
<b>I.1.1 <i>INPUTS</i> DETERMINANTES NO AUC .....</b>	<b>50</b>
<b>I.2 <i>INPUTS</i> CONDICIONANTES DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA” .....</b>	<b>59</b>
<b>I.2.2 <i>INPUTS</i> CONDICIONANTES NO AUC .....</b>	<b>66</b>
<b>I.3 ATRIBUTOS DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA” .....</b>	<b>74</b>
<b>I.4 APLICAÇÕES DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA” .....</b>	<b>77</b>
<b>CAPÍTULO II – INTERFACES ENTRE O URBANO E A QUALIDADE DO AR NO AUC – AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA. ....</b>	<b>85</b>
<b>II.1 QUALIDADE DO AR EM ESCALA MESO NO AUC .....</b>	<b>86</b>
<b>II.1.1 A CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFERICA .....</b>	<b>97</b>
<b>II.1.2 ANÁLISE DOS MODELOS DE DISPERSÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>II.2 QUALIDADE DO AR EM ESCALA MICRO NO AUC .....</b>	<b>110</b>
<b>II.2.1 A COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS .....</b>	<b>110</b>
<b>II. 2.2 CONDIÇÕES METEOROLOGICAS NAS CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS .....</b>	<b>114</b>
<b>II 2.3 ANÁLISE DAS CAMPANHA DE COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS ....</b>	<b>116</b>
<b>CAPÍTULO III – A TEMPORALIDADE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: INTERAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS CLIMÁTICOS E A POLUIÇÃO DO AR NO AUC .....</b>	<b>125</b>

<b>III.1 OSCILAÇÕES TEMPORAIS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>127</b>
III.1.1 OSCILAÇÃO ANUAL.....	129
III.1.2 OSCILAÇÕES INTRA-ANUAIS.....	133
<b>III.2 DIREÇÃO E VELOCIDADE DOS VENTOS.....</b>	<b>136</b>
<b>III.3 PRECIPITAÇÃO .....</b>	<b>144</b>
<b>III.4 TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR .....</b>	<b>150</b>
III.4.1 TEMPERATURA .....	151
III.4.2 UMIDADE RELATIVA DO AR .....	158
<b>III.5 ANÁLISE RÍTMICA.....</b>	<b>165</b>
III.5.1 OUTUBRO DE 2010.....	166
III.5.2 ABRIL DE 2011 .....	167
III.5.3 ABRIL DE 2012 .....	169
III.5.4 JULHO DE 2012.....	170
<b>CAPÍTULO IV – PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O PROBLEMA DA QUALIDADE DO AR NO AUC .....</b>	<b>174</b>
<b>IV.1 MÉTODOS E TÉCNICAS PARA A ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E QUALIDADE DO AR .....</b>	<b>174</b>
<b>IV.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E VARIABILIDADE CLIMÁTICA EM CURITIBA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>178</b>
<b>IV.3 VARIABILIDADE CLIMÁTICA EM CURITIBA ASSOCIADA A QUALIDADE DO AR .....</b>	<b>183</b>
<b>IV.4 TENDÊNCIAS PARA OS POLUENTES EM CURITIBA ASSOCIADA A MUDANÇAS NO CLIMA.....</b>	<b>187</b>
<b>CAPÍTULO V – A QUALIDADE DO AR NO AUC NA DIMENSÃO DA MESO E DA MICRO-ESCALA ESPACIAIS – CONCLUSÕES.....</b>	<b>198</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>206</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>210</b>



## INTRODUÇÃO

A problemática ambiental se configura, como um dos mais importantes desafios à ciência e à sociedade. Consequência do modelo de vida predominante em nossa sociedade, ao qual se preza o consumo e o individualismo, o momento presente atesta profunda crise ambiental.

As consequências de um modelo de sociedade industrial, como a vigente, frente ao meio ambiente e a qualidade de vida, podem ser estudadas por “n” frentes, vide a complexidade e abrangência de tal questão. Sua solução está além de avanços tecnológicos, envolvendo uma ampla reorganização das bases políticas, econômicas, sociais e culturais vigentes (LOUREIRO, 2006).

Neste contexto, as cidades se caracterizam como locais onde os conflitos sociedade-natureza se manifestam com maior intensidade (SPAGNOLO, 2000), perpetuando-se como uma relação desequilibrada e trazendo consequências diretas à qualidade de vida dos seus habitantes (FERNANDEZ, 2000b; MENDONÇA, 2004a).

Spagnolo (2000) ressalta que a gênese destes conflitos ambientais urbanos não se encontra apenas no puro crescimento das medidas físicas das cidades, mas sim, em um amplo processo histórico, político e econômico específico para cada caso.

Segundo Mendonça (1993 e 2004a) os processos de industrialização foram os grandes desencadeadores da degradação do meio ambiente, consequências de um modelo de desenvolvimento concentrador de benefícios e de forte impacto sobre a qualidade de vida da sociedade como um todo.

Tal modelo de desenvolvimento nem sempre ordenou a expansão urbana e industrial das cidades, contudo, atualmente é o que se apropria, planeja, arruma ou modifica o espaço existente de acordo com suas finalidades (LEFEBVRE, 1999).

A má qualidade do ar, foco deste estudo, surge como consequência direta destes processos de industrialização e urbanização. Neste contexto, Londres revela-se como um exemplo clássico desta relação.

A cidade apresenta registros de má qualidade do ar desde o século XIII, mas é a partir do século XVII, sobretudo após a revolução industrial, que este fenômeno se torna mais frequente e intenso. O grande *smog* de Londres,

episódio ocorrido em 1952, tornou-se um marco desse problema para a cidade e para o mundo, evidenciando as consequências do inchaço urbano para a má qualidade do ar e por consequência a saúde humana (BRIMBLECOMBE, 1976).

Não para menos que tal fato se deu em Londres, capital do país que nos anos 1950 já contava com 78% de sua população vivendo em meios urbanos, o que indica que já nesta época, o local apresentava altas índices de emissões poluentes concentrados. Aliado a isso, tem-se uma situação meteorológica específica onde a presença de um anticiclone, sistema de alta pressão e estabilidade atmosférica, dificultou a dispersão dos poluentes emitidos, resultando no evento chamado *smog* (BELL, et. al., , 2004).

Se a princípio, a má qualidade do ar era um problema típico das grandes metrópoles industriais do mundo ocidental, a expansão do capitalismo industrial em conjunto ao processo de globalização, a leva para regiões distantes do chamado primeiro mundo, atingindo também países em desenvolvimento da América Latina, África e Ásia.

Sobre este fato, a Organização Mundial da Saúde, em recente relatório publicado (2016), aponta que, atualmente, cerca de 90% da população mundial respira um ar que não atende aos parâmetros mínimos de qualidade, estipulados pela organização. O relatório enfatiza o crescimento deste problema na região do Sudeste asiático, em decorrência da forte urbanização observada nesta porção do continente.

Em termos de monitoramento e fiscalização, o mesmo relatório reforça a existência de um *gap* no que tange os países desenvolvidos e aqueles em via de desenvolvimento, alertando para falta de investimentos nas regiões mais pobres do globo (OMS, 2016).

O Brasil neste contexto, também passa a sofrer com as consequências do crescimento urbano e industrial, sem a devida estruturação. O país torna-se proeminentemente urbano a partir dos anos 1970. Os centros urbanos brasileiros, a partir desta década, se configuram de forma inchada e adensada. Tal fato, aliado a ausência de planejamento, dificulta a correta absorção dos contingentes populacionais proveniente das zonas rurais e do crescimento vegetativo natural da população, que já residia nestes centros, e transforma as cidades brasileiras em sítios ambientalmente complexos e problemáticos (SANTOS, 1993).

Sobre a problemática socioambiental brasileira, Ribeiro (1993) disserta:

É dramática, senão trágica, a situação ambiental em cidades brasileiras, onde proliferam desequilíbrios ecológicos e poluição, miséria social e favelização, degradação do meio ambiente construído, desperdício de recursos naturais e humanos, carências de saneamento básico ambiental. Até mesmo a classe alta, aparentemente beneficiada com a situação atual, vive assustada pela tensão urbana e a violência social, sofrendo ansiedade, medo e desconforto. Nas regiões metropolitanas, a crise ambiental e a consciência ecológica são mais profundas. Nelas, a dívida ambiental se avoluma, tornando urgente maior investimento de recursos para melhorar a qualidade ambiental (...). (RIBEIRO, 1993, P.56).

O crescimento desordenado das cidades brasileiras traz, entre os problemas socioambientais em seu lastro, a má qualidade do ar. No contexto deste país, destacam-se os episódios ocorridos em Cubatão, cidade do litoral paulista, nos anos 1980, onde novamente pode-se constatar o efeito de um anticiclone em uma região densamente industrializada.

A inserção do Paraná no quadro da industrialização do Brasil a partir dos anos 1970 colocou a área de estudo desta pesquisa como uma das regiões brasileiras a qual o inchaço e o adensamento urbanos, previamente mencionados, foram mais visíveis (FIRKOWSKI, 1997).

Observa-se, a partir desta década, uma, cada vez mais crescente, degradação ambiental no AUC, dado que em boa parte do espaço urbano desta região, as políticas públicas não se ativeram à interação entre a expansão e a qualidade vida urbana. , como consequência, uma significativa parcela da população do AUC passa a conviver com diversos tipos de problemas relacionados a questões ambientais, entre elas: insuficiência ou falta de saneamento básico, má qualidade da água, poluição do ar, desconforto térmico entre tantos outros (DANNI-OLIVEIRA,2000; MENDONÇA, 2004a; DESCHAMPS, 2004; DUMKE, 2007 ).

Nesta conjuntura, o presente trabalho apresenta como foco de investigação a problemática da qualidade do Ar no âmbito de Curitiba e seu Aglomerado Urbano (AUC).

Curitiba conta atualmente com uma população estimada (2014) de 1.864.416 habitantes, segundo dados do IBGE. O censo de 2010 aponta a totalidade da população do município como urbana e uma densidade demográfica alta, de 4027,04 hab./km<sup>2</sup>.

Instituída em 1973 e constituída originalmente de quatorze municípios, a Região Metropolitana de Curitiba (RMC) conta hoje com um total de vinte e nove municípios, estendendo-se da divisa de São Paulo ao Norte até a divisa com Santa Catarina ao Sul. Tais municípios, de acordo com a legislação, apresentam de alguma forma, uma relação de interdependência com a capital, contudo, conforme aponta Firkowski (2009), pouco mais de dez municípios podem de fato serem considerados pertencentes a dinâmica de relações metropolitanas.

Para Firkowski (2002) o conjunto de cidades que compõe o AUC são Almirante Tamandaré, Araucária, Campina Grande do Sul, Colombo, Curitiba, Campo Largo, Campo Magro, Fazenda Rio Grande, Pinhais, Piraquara, Quatro Barras e São José dos Pinhais. A exceção de Piraquara, todos limítrofes a capital.

Firkowski (1997) salienta ainda que a intervenção estatal foi fundamental para a industrialização e consequente crescimento urbano da região. Silva (2006) reafirma tal teoria, trazendo a criação da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) no município de Araucária, no AUC, e, a criação da Cidade Industrial de Curitiba (CIC) e do Centro Industrial de Araucária (CIAR) em 1973, consequências diretas do II Plano Nacional de Desenvolvimento (PND), como marcos para a industrialização e crescimento urbano da AUC como um todo.

Sobre a criação do CIAR e sua influência na população local de Araucária, Silva (2006) aponta:

[...] modifica-se o papel do centro tradicional que antes da reestruturação era o espaço articulador de todas as funções urbanas (circulação, habitação e trabalho) e abrigava de forma concentrada a diversidade de relações socioespaciais e toda a população urbana do município. A partir da década de 1970, apesar de continuar desempenhando o papel de centro político-administrativo, este subespaço passa a ser reservado como local de moradia das famílias tradicionais, que pela maior presença dos meios de consumo coletivo e individual, possibilitava um padrão de vida urbano superior ao recém desbravado da periferia. O centro tradicional deixa de ser, portanto o único polo em torno do qual se dá a estruturação urbana passando a dividir este papel com a CIAR. (SILVA, 2006, p. 85)

Os problemas referentes à poluição do ar no Aglomerado Urbano de Curitiba tornam-se então, mais frequentes a partir deste período (anos 1970). Souza (2006) atesta que a falta de fiscalização e monitoramento neste período ocasionou uma série de episódios relatados pela mídia local. Aponta ainda que

a ausência de dados oficiais e de pesquisas na região, à época, gerou uma lacuna de informações, que impossibilita o detalhamento sobre os problemas e episódios ocorridos.

Segundo a autora, as primeiras ações do Estado para garantir o monitoramento da qualidade do ar na região de Curitiba, resultam da instalação das primeiras estações oficiais de monitoramento pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), essas foram fruto de uma pressão exercida pela mídia e Organizações Não Governamentais, como a Associação de Moradores de Araucária (AMAR).

Tal monitoramento teve início em 1985, com a instalação de uma estação de monitoramento na Santa Casa de Curitiba, localizada na Praça Rui Barbosa, região central da cidade, e outras três no município de Araucária.

A rede chegou a contar com dez estações, quatro em Araucária, uma em Colombo e as demais cinco em Curitiba. Recentemente, duas delas, em Colombo e na Santa Casa, foram desativadas pelo alto custo de manutenção.

Atualmente, a rede conta com um total de oito estações automáticas dispersas entre os municípios de Araucária e Curitiba (Figura 1). Mensalmente boletins com os resultados das coletas são disponibilizados através do sítio eletrônico do órgão para a população, indicando de maneira simples os dias do mês com pior e melhor qualidade do ar em cada estação.

A poluição do ar em Curitiba foi alvo de estudos de Danni-Oliveira (2000) que constatou que os locais com intenso tráfego de veículos, juntamente com a presença de indústrias, são os grandes responsáveis pela má qualidade do ar na cidade. A autora traz ainda, situações climáticas como, a presença de Massas Polares e a ausência de chuvas, como os fatores que potencializam a má qualidade do ar na região.

O estudo realizado por Andrade et. al., (2012), atesta as conclusões de Danni-Oliveira, analisando que em Curitiba, cerca de 55% das emissões de material particulado fino provém de fontes móveis (meios de transporte de forma geral), enquanto que, apenas 13% são originárias de fontes industriais. As demais provêm de queima de biomassa, construções civis e outras fontes menores. O mesmo estudo apresenta ainda uma relação inversa entre chuva e a presença de material particulado em suspensão na cidade.

Os níveis de poluição registrados pelas estações oficiais do IAP eram apresentados de forma descrita e discutidos através de relatórios anuais oficiais redigidos pela mesma instituição. Estes relatórios, publicados entre 2001 e 2013 descreviam o comportamento dos poluentes por estação e serviram de embasamento para a criação do Inventário de Emissões do Estado do Paraná. Contudo, desde então, não foram mais publicados.

Em estudo mais recente, Castelhana et. al., (2014) apontaram os poluentes NO<sub>2</sub>, PTS e SO<sub>2</sub> como aqueles que mais vezes ultrapassaram os limites mínimos de qualidade do ar, atestados pela legislação brasileira vigente. Os autores situam o ozônio troposférico como outro poluente com transgressões a lei, mas em menor escala, em relação aos demais mencionados.

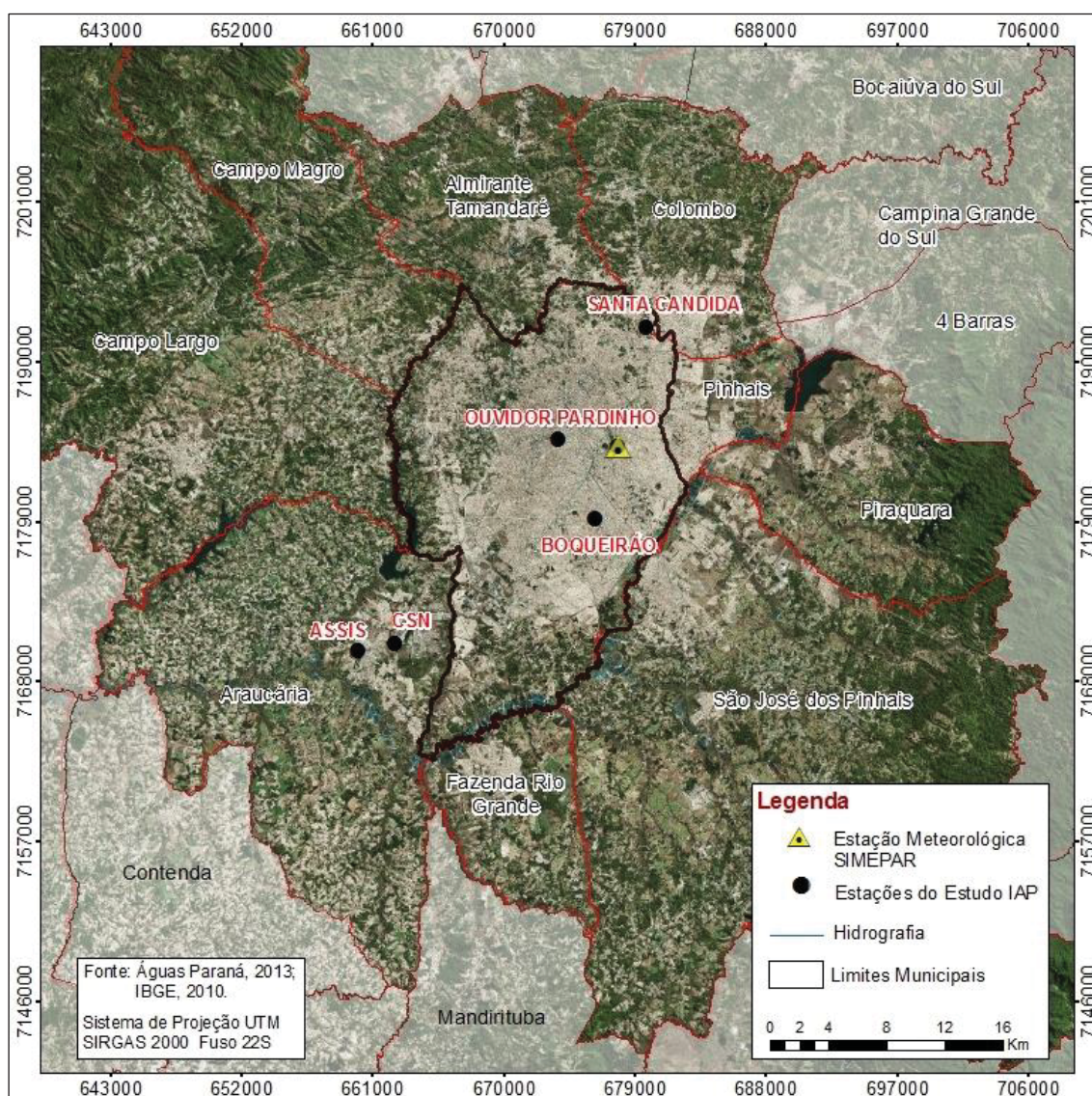
No mesmo trabalho, a região central de Curitiba, junto a região industrial de Araucária, município ao Sul da capital, e a região central de Colombo, localizado na região Norte do AUC, foram os locais com níveis de poluição mais proeminentes, reafirmando as relações espaciais encontradas por Danni-Oliveira anteriormente.

A região industrial de Araucária se destacou pelos altos valores em SO<sub>2</sub>, consequência direta das emissões industriais oriunda da presença de indústrias químicas (celulose e fertilizantes), petroquímica (refinarias) e siderúrgicas.

A região de Colombo, por outro lado, chegou a apresentar, no ano de 2012, um total de cento e dez dias com valores de Partículas Totais em Suspensão acima do considerado adequado. Estes altos valores são consequência das indústrias de extração e manufatura de calcário, típicas da região.

Os estudos prévios, citados nesta introdução reafirmam a necessidade de estudos sobre a temática proposta em específico para o Aglomerado Urbano de Curitiba, foco do presente estudo.



**FIGURA 1 – AUC - Localização das Estações da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar.**

FONTE: IAP, SIMEPAR e IBGE; Org.: Castelhana (2019)

## QUESTÕES NORTEADORAS

A questão da poluição do ar nas cidades suscita uma série de questionamentos diversos. Muitos deles encontram respaldo na literatura, a partir de inúmeros estudos de casos realizados nas mais diversas localidades do mundo. Todavia, muitos aspectos encontram-se ainda em aberto para uma efetiva compreensão da problemática, boa parte deles referentes às condições locais ou individualizadas da poluição do específica de cada cidade.

Neste contexto é que, para uma melhor organização e estruturação da pesquisa, um conjunto de questionamentos foram sintetizados em três eixos do trabalho, como se segue:



- I. Urbanização e poluição do ar no AUC:
  - a. Como se dá a influência da produção do espaço urbano na dinâmica da qualidade do ar no AUC?
  - b. Como se dá a relação entre o planejamento urbano e a poluição do ar no AUC?
  - c. Como o planejamento urbano pode contribuir na melhoria da qualidade do ar nas cidades?
- II. Clima e poluição do ar no AUC:
  - a. Quais elementos e fatores climáticos possuem maior significância nos valores de contaminantes do ar no AUC?
  - b. A dinâmica da poluição do ar no AUC apresenta variação diária, semanal e sazonal?
  - c. A poluição do ar no AUC apresentou tendência positiva ou negativa?
  - d. A mesma é uniforme para todas as estações de monitoramento?
- III. Perspectivas futuras da poluição do ar no AUC.
  - a. Considerando os cenários futuros de mudanças climáticas globais propostos pelo IPCC e PBMC, é possível traçar um cenário da qualidade do ar no AUC?
  - b. Se sim, como será tal situação?
  - c. Quais medidas devem ser tomadas para se melhorar a situação atual e evitar cenários piores no futuro?

## **HIPÓTESE**

Dada a dinamicidade dos poluentes atmosféricos estima-se que, no âmbito desta pesquisa, a distribuição espaço/temporal da poluição do ar no AUC se manifeste de forma multiescalar.

A poluição do ar manifesta uma oscilação anual no âmbito do AUC que reflete uma variabilidade anual das condições meteorológico-climáticas, especialmente à variabilidade intra-anual da temperatura e do regime de chuvas da cidade. Todavia, quando se analisa a manifestação da poluição do ar na escala temporal semanal e/ou diária, é a dinâmica da cidade, na figura

principalmente do tráfego de veículos, que determina a concentração/diluição da poluição do ar na cidade em análise.

A configuração da estrutura urbana incide diretamente na variação da dimensão espacial da poluição do ar no AUC; nesta escala, da aglomeração urbana, o papel das indústrias e vias de alto tráfego destacam-se como localidades de maior concentração de poluentes. Já na escala de detalhe, estima-se que a morfologia urbana, especialmente a distribuição dos edifícios e a altura da verticalização, aliada às áreas verdes e livres, é que influenciam diretamente na distribuição espacial da poluição do ar no AUC.

Considerando-se os cenários de mudanças climáticas futuras, conjectura-se que, a oscilação temporal dos poluentes no AUC sofrerá modificações importantes, tanto em intensidade quanto em frequência, a depender do poluente observado.

## **OBJETIVOS**

A finalidade deste trabalho é analisar a qualidade do ar no Aglomerado Urbano de Curitiba sob uma perspectiva geográfica, de modo a compreender a distribuição temporal e espacial da poluição atmosférica na área de estudo.

Neste sentido objetiva-se colocar em evidencia os fatores espaciais-geográficos que determinam tal distribuição e as situações climáticas condicionantes da dispersão ou acúmulo de poluentes. O estudo abre-se também à abordagem da possibilidade de cenários futuros de mudanças climáticas virem a interferir na qualidade do ar da área de estudo.

Para a elaboração da pesquisa foram levantados quatro objetivos específicos que, cada um em sua dimensão, evidenciam particularidades do estudo:

- I – Relacionar as variáveis meteorológicas, (temperatura, direção e velocidade dos ventos, precipitação e umidade relativa do ar) e os níveis de poluição do ar, apontando quais as situações climáticas favoráveis e desfavoráveis para a concentração de cada poluente analisado no AUC;
- II – Relacionar a espacialidade dos poluentes com as características geográficas do AUC (Uso do solo, Habitações, Industrialização, Transportes, etc.);

III – Estabelecer e analisar cenários futuros para a situação da qualidade do ar em Curitiba, levando em conta projeções climáticas do IPCC e PBMC e os resultados obtidos pelos objetivos I;

IV – Propor e sugerir medidas e ações à gestão pública visando a manutenção e/ou melhoria das condições de qualidade do ar na cidade de Curitiba e no AUC.

Levando em conta a complexidade do fenômeno aqui analisado, o capítulo I apresentará a metodologia utilizada para a abordagem geográfica na qualidade do ar no AUC.

No capítulo seguinte, procurou-se discutir a interface entre o urbano e a qualidade do ar no AUC, de modo que, foram utilizadas informações coletadas tanto pelas estações oficiais de monitoramento, quanto em campanhas de monitoramento em pontos específicos da área de estudo. Fora da rede de dados oficiais e em conjunto a modelos de dispersão que terão papel-chave na compreensão dos caminhos do planejamento e produção do espaço urbano para a dinâmica dos poluentes no sítio de estudo.

Serão apresentadas no capítulo III, análises de séries históricas de dados referentes à qualidade do ar, em conjunto com dados climáticos, a fim de se estipular estatisticamente quais as variáveis climáticas apresentam maior significância para o estudo da qualidade do ar no Aglomerado Urbano de Curitiba e como se dá tal relação, assim como, sob quais sistemas atmosféricos os níveis de qualidade de ar se encontram em seus piores níveis.

A variação climática do AUC estará também dentro do debate deste capítulo. Além do que se faz necessária a discussão para a sua relação com os processos de dispersão e acúmulo de poluentes e o desenvolvimento urbano de Curitiba e região.

Com tais dados em mãos, serão traçados, a partir de cenários propostos pelos IPCC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas e dados históricos do clima de Curitiba, projeções futuras para a qualidade do ar no AUC no capítulo IV.

Evidencia-se as afirmações propostas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que nos últimos anos, apontam uma intensificação das temperaturas da atmosfera do Planeta na ordem de 0,2 °C a 4,8 °C no século XXI. O Relatório de Avaliação Nacional de Mudanças

Climáticas apresentado pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), em 2014 prevê intensificação da seca no Nordeste e no Norte, e aumento de chuvas no Sul e Sudeste.

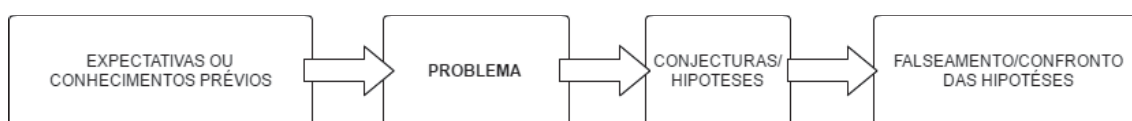
Nestes cenários, as grandes metrópoles são apontadas como os locais mais vulneráveis, uma vez que, a complexidade de seus ambientes permite que cenários de ilhas de calor e inundações ocorram com maior facilidade.

Por fim, no capítulo V, estarão presentes as conclusões deste trabalho, abarcando uma série de sugestões e propostas a serem elaboradas e destinadas ao poder público e sociedade, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos no que tange a qualidade do ar.

## CAPÍTULO I – PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS PARA UMA ABORDAGEM GEOGRÁFICA DA QUALIDADE DO AR NA CIDADE

Esta tese foi elaborada tomando-se por base o método hipotético-dedutivo (MARCONI E LAKATOS, 1985), cuja perspectiva considera que, os objetos de estudo científicos, possuem características gerais, mas que se diferenciam em suas particularidades. Este método permite a abordagem das hipóteses da pesquisa segundo quatro passos, conforme apontados na figura 2.

**FIGURA 2** - Etapas do Método Hipotético-dedutivo.



FONTE: adaptado de Marconi e Lakatos (1985); Org.: Castelhana (2019).

Segundo o método, parte-se de um dado conhecimento já existente, através do qual se constrói um problema de estudo, fruto de questionamentos acerca da realidade observada. A partir do problema, e com o auxílio de dadas condições científicas e lógicas, chega-se as conjecturas ou hipóteses, as quais, no momento seguinte, serão falseadas ou confrontadas com fatos, estes obtidos através de experimentos (MARCONI E LAKATOS, 1985; SILVEIRA, 2012).

Assim, de acordo com Silveira (2012):

Sempre haverá a possibilidade de, no futuro, derivar da teoria uma consequência que seja incompatível com os fatos e, portanto, teorias científicas são sempre conjecturas que poderão ser refutadas. Não há forma de se provar a verdade de uma teoria científica, mas às vezes é possível descobrir que uma teoria é falsa (SILVEIRA, 2012, p. 214).

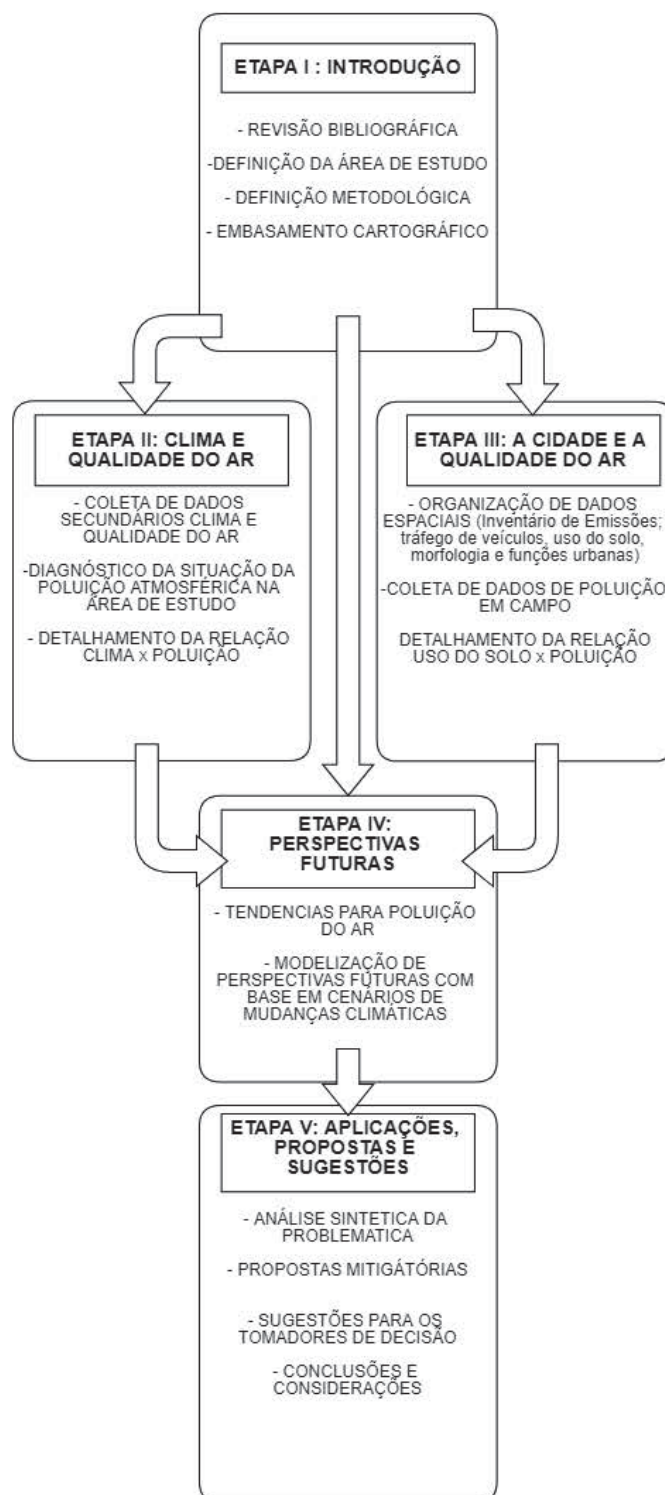
A estrutura desta pesquisa seguiu os objetivos centrais e específicos citados previamente, e têm no esquema da figura 3, de maneira sucinta, os encaminhamentos metodológicos e etapas realizadas para sua conclusão.

Em um primeiro momento foi realizada uma ampla leitura e revisão bibliográfica tanto na área da geografia como em outros campos do conhecimento onde a temática da qualidade do ar é presente.

Tais pesquisas foram realizadas junto ao banco de teses da CAPES, Anais do Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Revista Brasileira de

Climatologia e pelo portal de buscas “Google Acadêmico”, possibilitando buscas em publicações e periódicos internacionais.

**FIGURA 3 - Fluxograma Geral desta Pesquisa**



FONTE: Castelhana (2019)

A primeira etapa, sobretudo de revisões teóricas, embasou a fase seguinte, constituídas das etapas II e III. A etapa II tem como foco central a

relação entre o clima e a qualidade do ar no AUC, envolvendo coleta e tratamento de dados, e aferições estatísticas entre as variáveis.

A etapa III foi desenvolvida em paralelo a etapa II, abarcando a relação entre a cidade e a produção de seu espaço urbano com os níveis de poluição. Nesta etapa, ocorreram as campanhas de coleta de poluentes em campo, aliado a organização e disposição de dados espaciais, como inventários de emissões, modelos de dispersão, dados de tráfego de veículos entre outros.

A partir destas fases, tem-se então a concepção dos produtos finais deste trabalho, apontados como as Etapas IV e V e constituídos por aplicações, propostas e sugestões para os gestores (Etapa V) e possíveis cenários futuros pensando na situação de mudanças climáticas (Etapa IV)

No âmbito da geografia, a presente pesquisa foi desenvolvida sob a perspectiva socioambiental. Esta linha de pensamento propõe trabalhos que enxergam os problemas ambientais como resultantes da interação entre sociedade e natureza.

Mendonça (2001) aponta que tal eixo, na geografia contemporânea, surge a partir de geógrafos físicos com influência da geografia radical e crítica, e se caracteriza como possuidora de uma função social bem clara, concernindo estudos que visam reduzir a degradação ambiental e melhorar a qualidade de vida da sociedade.

Segundo o autor, esta linha de pesquisa é influenciada pelo marxismo (abordagem da sociedade) juntamente com a abordagem da base físico-natural do espaço, posto que os problemas socioambientais contemporâneos são derivados desta interação conflituosa. Mendonça aponta ainda, que a vertente socioambiental se caracteriza por sua inter e transdisciplinaridade e pelo emprego de uma variada gama de métodos científicos aplicados nos mais diferentes estudos.

Cabe enfatizar que a temática envolvendo os estudos acerca da relação sociedade/natureza não é exclusiva da geografia e tampouco contemporânea (CAMPONOGARA ET, AL, 2007).

Esta tese enfoca, portanto, uma abordagem geográfica sobre o problema da qualidade do ar na região de Curitiba, a partir de uma perspectiva que integra a natureza (sítio urbano, clima, etc.) e a sociedade (uso e ocupação do solo, funções urbanas, emissão de poluentes atmosféricos). Ressalta-se assim,



a afirmação de Ross (2011) ao explanar as abordagens geográficas em pesquisas ambientais:

[...] as análises ambientais com enfoque geográfico prescindem dos mesmos princípios da geografia, os quais sejam o de atender as relações das sociedades humanas de um determinado território (espaço físico) com o meio natural, ou seja, com a natureza deste território. (ROSS,2011, p.66)

Buscando um olhar sistêmico que permeia as relações entre sociedade e natureza nas cidades, sob o ponto de vista do clima, Monteiro (1976) tece uma metodologia para a análise do clima urbano, denominada Sistema Clima Urbano (S.C.U).

Iniciando seu estudo, o autor revisa uma série de trabalhos acerca do clima urbano, muitos dos quais, elaborados sob uma ótica cartesiana, e que propunham o homem como um ser antagônico a natureza, no que diz respeito ao clima urbano.

Sua obra, por outro lado, interpreta o homem e a natureza como coparticipantes na criação do clima específico de uma cidade, e, portanto, tem na Teoria Geral dos Sistemas o seu aporte teórico fundamental para a finalidade.

O Sistema Clima Urbano é posto pelo pesquisador como um sistema aberto, em que o aporte de energia se dá através da radiação solar, portanto de natureza térmica. A definição das dimensões do S.C.U são de responsabilidade do pesquisador, uma vez que, segundo Monteiro, o S.C.U pode ser replicado em cidades e espaços urbanizados de distintas dinâmicas e tamanhos, a depender do objetivo central da pesquisa.

O autor segue explanando sua metodologia e propõe dez postulados básicos para sua melhor interpretação. Dentre estes, ressalta-se o nono, que o admite como auto regulador, dado que, após a constatação das disfunções no clima urbano do sítio analisado, os mesmos podem ser corrigidos ou modificados pelos tomadores de decisão, através de intervenções ou adaptações do espaço urbano, da forma que lhes for mais conveniente.

Reiterando a interação entre o homem e o meio ambiente, presente em seus estudos, o autor aponta, por fim, os três canais da percepção humana em relação às nuances do clima urbano. Segundo o pesquisador, não se pretende separar o clima e analisar seus componentes isoladamente, mas sim, realizar

uma aglutinação de elementos em conjuntos, e que estes conjuntos possibilitem a manutenção de uma dada associação intrínseca com a atmosfera.

Os três canais da percepção do clima urbano são: o termodinâmico, que trata das questões diretamente ligadas ao conforto térmico; o hidrometeorológico, que aborda as questões ligadas às precipitações e suas consequências; e por fim, aquele que será abordado nesta tese, o canal Físico-Químico, que trata da temática da qualidade do ar.

Monteiro (1976) aponta que este último, diferentemente dos demais, tem a sua gênese unicamente na atividade humana. O autor cita algumas de suas características como, sua cumulatividade, sua projeção do núcleo ao ambiente, seu produto final como a poluição atmosférica e suas consequências para o homem, como problemas sanitários e doenças respiratórias, entre outras.

Cada um destes canais apresenta suas peculiaridades o que faz com o número de publicações sobre cada um seja diferente. Tal fato foi tratado por Rodrigues et al., (2012), que compararam o número de teses e dissertações publicadas dentro de cada canal entre os anos de 1990 e 2010, revelando um desequilíbrio elevado entre os mesmos, com um alto número de publicações no subsistema termodinâmico, seguido pelo hidrometeorológico e por último o físico-químico.

Os trabalhos que evidenciam essa temática na geografia são escassos, e refletem as dificuldades em obter registros para qualificar as publicações, sejam eles primários ou secundários. Os equipamentos utilizados para a coleta de dados são, de maneira geral, de alto custo, e poucos são os municípios que contam com estações de monitoramento da qualidade do ar que possam embasar estudos a este respeito.

Complementando esta análise, Castelhana (2016) realizou uma breve revisão bibliográfica, revelando que estudos de qualidade do ar, dentro da geografia brasileira, podem-se mostrar sob três aspectos estruturantes primários, são eles: saúde, climatologia e planejamento urbano (Figura 4).

No aspecto da saúde, se encaixam trabalhos que propõem como função social, compreender a dinâmica de enfermidades que tenham como agente desencadeador a má qualidade do ar, tais como doenças respiratórias, de pele, entre outras.

No âmbito do planejamento urbano, opta-se por trabalhar tal temática com um viés espacial, visando a identificação de *hotspots*, fontes emissoras, e principalmente, eficácia de medidas mitigatórias. Tais trabalhos tem como ferramenta metodológica principal, o mapeamento dos poluentes nos ambientes urbanos.

Por fim, dentro da questão climatológica, encontram-se pesquisas que trabalham mais diretamente com séries históricas e suas correlações com as condicionantes climáticas, sejam elas, chuva, radiação, temperatura, velocidade e direção dos ventos, entre outras, e visam identificar sob quais aspectos climatológicos a qualidade do ar é mais ou menos expressiva.

Estes três aspectos não são exclusivos, podendo, portanto, em um trabalho, serem identificados até mesmos os três vieses, demonstrando além da multidisciplinaridade, uma temática interdisciplinar. A interface entre os três se figuraria em uma pesquisa com riqueza de abordagem e aplicação.

**FIGURA 4** - Aspectos Abordados por Trabalhos na Área de Qualidade do Ar no Âmbito da Geografia no Brasil.



Org.: Castelhana (2016).

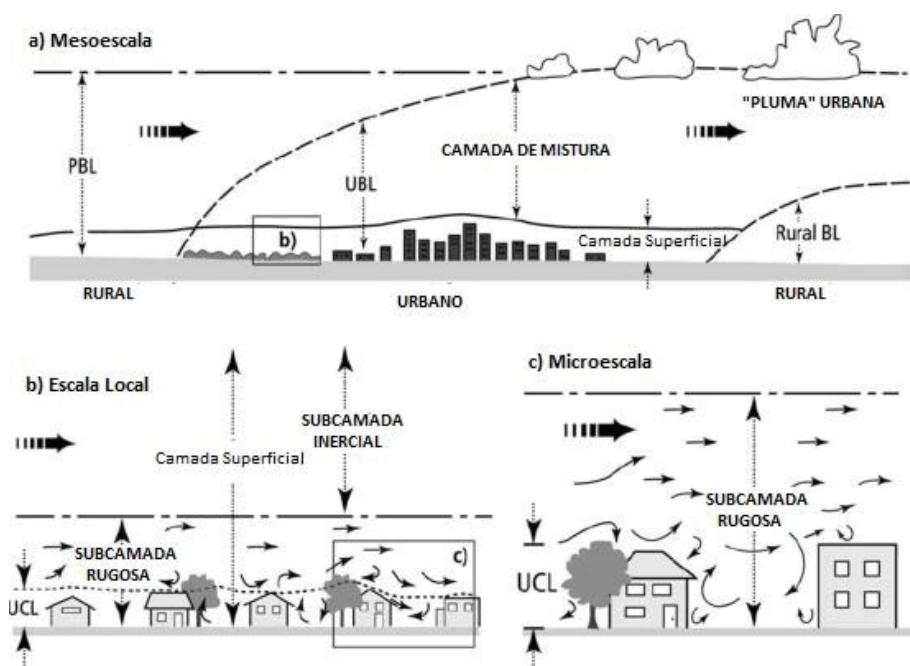
Ainda sobre o subsistema físico-químico, é mencionada por Monteiro (1976), a necessidade de grande acuidade na coleta dos dados e também de um levantamento detalhado das fontes emissoras, constatando que, a questão da poluição atmosférica deve ser corrigida na fonte, no cerne do problema, e não atribuir toda a responsabilidade à circulação atmosférica, apontada apenas como uma condicionante. Segundo o próprio, a atmosfera possui uma capacidade “autolimpante”, em função de seu dinamismo e sua capacidade difusora.

Ademais da concepção sistêmica do Clima Urbano, apresentada por Monteiro (1976), é importante remetermos também aos trabalhos do geógrafo canadense Timothy Oke, que propõe uma compreensão multi-escalar tempo/espacialmente do Clima Urbano (MILS, 2009; MENDONÇA, 1994).

Oke (2006) caracteriza o clima urbano como um fenômeno tridimensional, ao qual devem ser definidas as escalas temporais, horizontais e verticais. Os tipos de instrumentos a serem utilizados, localização e mesmo quantidade destes instrumentos devem ser definidos levando em conta tais escalas de análise, pretendidas no estudo a ser realizado (OKE, 2006).

As escalas horizontais aplicadas ao Clima Urbano, propostas por Oke (2006), são enumeradas em Mesoescala, Escala Local e Microescala. Já a sua proposta de “camadas”, ou escalas verticais de análise climática, propõe a cidade compreendida em duas escalas distintas, a *Urban Boundary Layer* (Camada Limite Urbana) que compreende a atmosfera alterada pelo efeito urbano em mesoescala e a *Urban Canopy Layer* (Camada de Cobertura Urbana) atestando as alterações em escala micro e intraurbana. Estudos acerca da UBL abordam o clima urbano em escala meso, enquanto que aqueles voltados para a UCL se encaixam nas escalas locais e micro (OKE, 2004).

**FIGURA 5–** Escalas do Clima Urbano por Tim Oke



FONTE: Oke, 2004.

Enquanto ciência que estuda a relação dos fenômenos, naturais e/ou sociais com o espaço, a geografia mostra-se como uma área do conhecimento que possibilita uma análise integrada e abrangente da dinâmica da poluição atmosférica. Isto se deve ao fato de tal ciência ser a única, dentre as ciências humanas, a estreitar laços com a abordagem do quadro natural do planeta, e por ser uma ciência com uma sólida relação com inúmeras outras áreas do conhecimento (MENDONÇA, 1998).

O estado da qualidade do ar situa-se como fruto da relação entre fatores espaciais e temporais distintos, agindo sob uma dada localidade, o que lhe garante um caráter geográfico específico. Tais fatores serão aqui denominados “determinantes” e “condicionantes” respectivamente.

Um determinante é aquele fator chave, sem o qual a problemática não se desenvolveria, ligado à gênese de tal questão. Já a condicionante seria um fator não relacionado à origem do problema em si, mas que surge como um agente que modera, regula ou potencializa a evolução do primeiro (LANDSBERG, 1981).

Aproximando estes conceitos da temática da qualidade do ar, encontram-se as fontes emissoras como agentes determinantes e os agentes que facilitam ou não a dispersão como os agentes condicionantes (Figura 6). Considera-se para esta pesquisa que estes conceitos são distintos e complementares no âmbito da qualidade do ar.

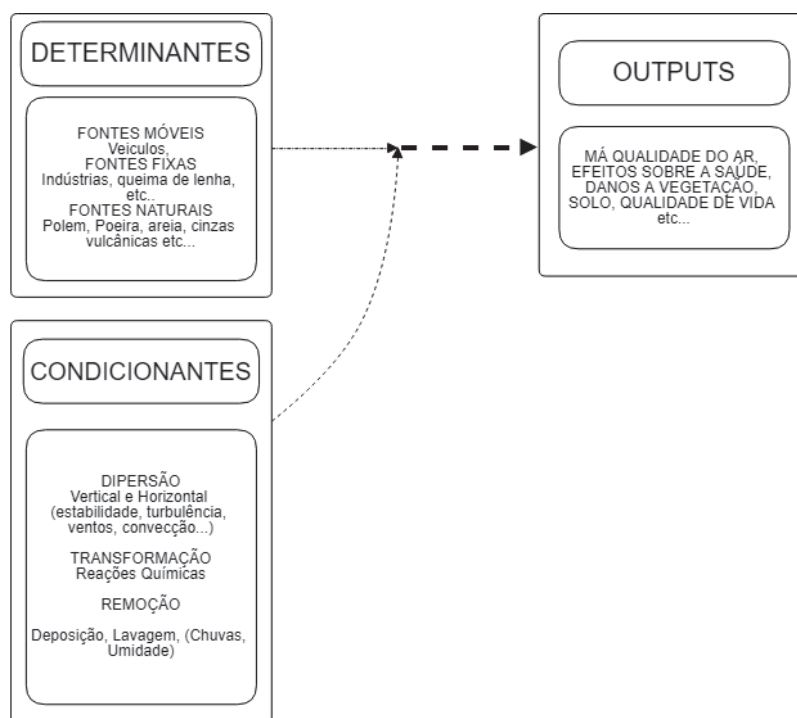
Esta concepção também é mostrada por McCormac (1971), ao colocar que a intensidade da poluição atmosférica em determinado local tem duas variáveis principais, o índice de poluentes emitidos, e o índice de dispersão e diluição de tais poluentes. O primeiro remete-se a um fator determinante, ligado diretamente à produção do espaço urbano e ao modo de vida, enquanto que o segundo, um condicionante, relativo principalmente às condições meteorológicas.

O conjunto destes índices tende a dar um caráter cíclico a dinâmica da qualidade do ar tanto em escala anual, quanto semanal e diária (OKE, 1978; ANDRADE, 1996).

Faz-se necessário neste momento, a definição química de poluição, apontado por Kampa e Castanas (2008) como a introdução de quaisquer substâncias em um dado meio, que seja diferente de seus componentes

naturais, a ponto de afetar de forma danosa o meio, podendo ter origem natural ou antrópica, assim observa-se, poluição do ar, da água, do solo, entre outros.

**FIGURA 6-** Estrutura do Processo de Poluição Atmosférica



FONTE: adaptado de Oke (1978). Org.: Castelhana (2019).

Outro conceito importante é o de contaminante, que se difere do poluente, por também ser, de origem diferente daquela do meio, contudo não ser de nível tão elevado a ponto de ser danoso (NASS, 2002).

Voltando as concepções sistêmicas, Mendonça (2004b) analisando o S.C.U de Monteiro em conjunto com a ideia de Sistema Ecológico Urbano proposta pelo PNUD/OPS (1997), traz o Sistema Ambiental Urbano (S.A.U) como uma abordagem integradora dos problemas socioambientais típicos de sítios urbanos.

Propõe-se um sistema composto por *Inputs*, atributos, *Outputs* e aplicações, que, em conjunto, apresentam uma concepção de específica de cada problema socioambiental. Cada um destes itens compõe-se de processos com pesos distintos a depender da escala de análise aplicada pelo pesquisador.

Os *inputs* se definem como os pontos de entrada do sistema, portanto os fluxos de matéria e energia, tanto na ordem natural quanto provenientes de processos sociais.

Os atributos, por outro lado, referem-se às características sociais e culturais constituintes da população local e típicas de cada sítio a ser estudado. Os *outputs* refletem os conflitos entre os *inputs* e os atributos, sendo caracterizados como os problemas socioambientais a serem estudados.

Ao fim, como diferencial do sistema apresentam-se as aplicações, momento que tange a elaboração de propostas e sugestões plausíveis para os problemas socioambientais urbanos supracitados. Esta última parte do S.A.U a diferencia de outras abordagens ambientais, dando o aspecto da prática e aplicação do estudo elaborado.

Sendo assim, a metodologia proposta por Mendonça (2004b) mostra-se mais abrangente do que a proposição de Monteiro (1976), que, em seus estudos elenca, sobretudo problemas ligados ao clima. A metodologia de Mendonça (2004b) por sua vez, possibilita análises de problemas socioambientais no âmbito urbano que vão além do espectro climático.

Dentro desta visão, em função da complexidade dos elementos componentes da problemática da qualidade do ar, optou-se por seguir um viés sistêmico, embasado pela metodologia de Mendonça (2004b).

Adaptando o S.A.U a pesquisa corrente, e levando em conta a discussão sobre determinantes e condicionantes, propõe-se um esquema metodológico integrado de fácil compreensão, estruturando, organizando e hierarquizando os componentes que formam a dinâmica da qualidade do ar. (Figura 7).

O diferencial desta adaptação está no discernimento entre *Inputs* determinantes e *inputs* condicionantes, o segundo ainda subdividido entre sociais ou construídos e naturais.

Atribuímos assim pesos distintos aos *inputs*, compreendendo que aqueles denominados “determinantes” apresentam um valor mais significativo no estado da qualidade do ar do local, enquanto que aos denominados “condicionantes” qualificam-se no papel de potencializar ou não o problema gerado no determinante.

Os fatores apontados como *inputs* determinantes são aqueles relacionados diretamente à emissão de poluentes e os tidos como responsáveis pela grande diferença de níveis de poluição em uma mancha urbana. Onde, a ausência destes fatores tornaria o problema em questão inexistente.



Os *inputs* condicionantes, por sua vez, são concebidos como elementos que potencializam o acúmulo ou dispersão dos poluentes. Tratam-se de fatores de ordem natural ou social. Não são estes os fatores que causam a má qualidade do ar, sendo-lhes relegado o papel de agente regulador ou moderador da situação gerada primeiramente pelo *input* determinante.

Entende-se, que as condições climáticas (a chuva, a dinâmica dos ventos, a umidade relativa do ar e a temperatura entrariam como os elementos mais proeminentes neste caso) agem como condicionantes ante a má qualidade do ar, dado que, conforme já apontado por Monteiro (1976), não são elas que geram más condições de poluição do ar, possibilitando que os poluentes se intensifiquem ou se dispersem a depender de suas interações.

Ainda no espectro dos *inputs* naturais, destaca-se a geomorfologia e a cobertura vegetal como agentes que podem intervir na dinâmica do presente objeto de estudo. No âmbito dos *inputs* construídos, destacam-se, sobretudo, a verticalização e o adensamento urbano, como aspectos que contribuem para o acúmulo de poluentes.

Os atributos, por sua vez, são concebidos como elementos próprios de cada sociedade, e se caracterizam como aspectos pertencentes à chamada superestrutura das sociedades (economia, política, cultura...), movimentando o Sistema Poluição Atmosférica e agindo sobre os seus *outputs* (MENDONÇA, 2004b).

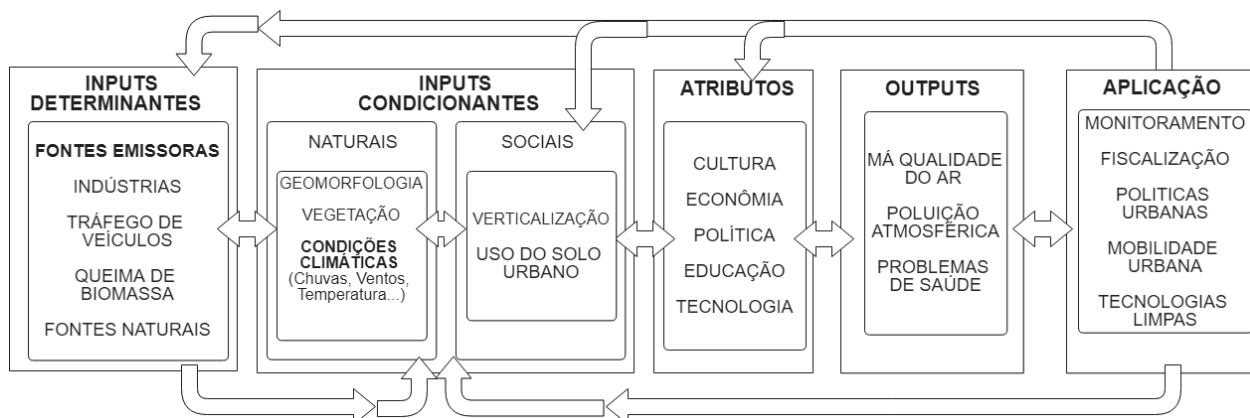
Como *outputs* do sistema, têm-se: a má qualidade do ar, a poluição atmosférica e as suas consequências à saúde.

Na fase da aplicação, destacam-se ações de monitoramento e fiscalização, políticas urbanas e de mobilidade urbana e novas tecnologias limpas, sendo que, as mais aplicadas estão no monitoramento e fiscalização em consonância a legislação ambiental.

Reitera-se o papel chave dos *inputs* determinantes para este sistema. Imagine-se que, na ausência destes o sistema seria desnecessário, pois os problemas observados nos *outputs* não chegariam a se formar.



**FIGURA 7-** O Sistema Poluição Atmosférica do AUC – Aglomerado Urbano de Curitiba/PR.



FONTE: Adaptado de Mendonça (2004b, p.201). Org.: Castelhana (2019).

A grande quantidade de *inputs* e de atributos que formam o sistema poluição atmosférica no A.U.C não permitem que relações lineares e simples expliquem a dinâmica, de tal fato que, justificam a escolha de uma metodologia integradora e sistêmica.

Oke (1978) também propõe um sistema semelhante, trazendo em um primeiro momento a fonte, seguido do estado da atmosfera, para então termos o resultado final e/ou ação.

Ao longo deste trabalho, serão realizadas análises referentes a quatro poluentes principais, tendo como critério de escolha, além de disponibilidade de dados, aqueles que tiveram os maiores índices registrados nos últimos dez anos, em levantamento realizado por Castelhana et al., (2014).

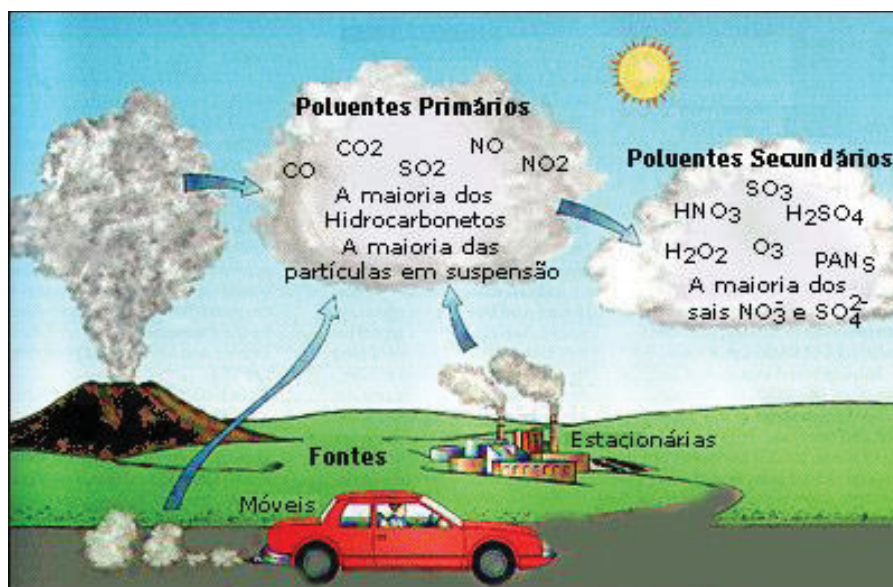
Os poluentes mencionados são: o Ozônio Troposférico (O<sub>3</sub>), Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>), Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>) e Partículas Totais em Suspensão (PTS). A seguir, serão apresentadas, de maneira breve, descrições dos poluentes supracitados tais como suas fontes (Figura 8), que, de maneira geral, são semelhantes e seus efeitos sobre a saúde humana e o ambiente.

As consequências de altas concentrações de poluição atmosférica, pode ser subdivida em três grupos denominados, estéticos, irritantes e tóxicos (BRANCO E MURGEL, 2004).

Os efeitos estéticos são aqueles classificados como alterações da aparência do ar que nos envolve e de estruturas físicas como um todo, e que afetam negativamente nossos sentidos, assim incluem-se a coloração do ar, fuligem, mau cheiro, desgaste de construções, entre outros.

Os efeitos irritantes são aqueles que causam certos desconfortos além da aparência, tais como ardência nos olhos e mucosas, e por fim, os efeitos tóxicos, classificados como consequências extremas a saúde em consequência de envenenamento por gases tóxicos (BRANCO E MURGEL, 2004).

**FIGURA 8** - Tipos de Poluentes do Ar conforme diferentes fontes.



FONTE: Pedroso. (2007).

Em relação aos poluentes tratados nesta tese, o  $\text{SO}_2$  é identificado como um gás não inflamável, incolor e com odor característico. Este gás tem facilidade para se solubilizar em água, formando um composto ácido de formula  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , denominado ácido Sulfuroso. Sua alta concentração na atmosfera pode gerar a chamada chuva ácida (NASS, 2002).

As fontes para o  $\text{SO}_2$  são tanto naturais quanto antrópicas. Suas principais fontes naturais decorrem da ação de vulcões, decaimento de material orgânico e ação solar sobre as águas do mar. Já as antrópicas, são resultados direto da queima e refino de combustíveis fósseis (ALBERTA ENVIROMMENT, 2003).

Sua alta solubilidade em ambientes aquosos o faz ser facilmente absorvido pelas vias aéreas e sistemas respiratórios (RALL, 1974). Este gás é responsável pela diminuição significativa do movimento de cílios nas vias respiratórias e aumento de secreção das mesmas, o que pode vir a comprometer o sistema respiratório (BRANCO E MURGEL, 2004).

A correlação entre altos níveis de  $\text{SO}_2$  nos centros urbanos e problemas respiratórios foi atestada por Nascimento et al., (2006) para a região de São

José dos Campos, Vigota et al., (1996) para Milão na Itália, Hatzakis et. al., (1986) para Atenas na Grécia, Souza (2006) para Araucária, no Paraná, dentre outros.

O PTS é toda a partícula com tamanho de até 100 micrômetros. Aerossóis, fumaça e pequenas partículas se encaixam nesta classificação. Outros parâmetros para material particulado, também são considerados como PM<sub>10</sub> (também denominado Partículas Inaláveis) que compreende o material particulado com até 10 micrometros, e o PM<sub>2,5</sub>, com até 2,5 micrometros (DERISIO, 2012).

Em estudo realizado pela CETESB (2015) em São Paulo, os veículos automotores foram apontados como os principais responsáveis pelas emissões de PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>, com 40% e 60% do total de emissões proveniente destas fontes respectivamente.

Segundo Tadano (2007), o material particulado tem a capacidade de se depositar na região superior do sistema respiratório além de penetrar na região alveolar do pulmão, causando danos à saúde, dado que, o ser humano não tem a capacidade de expeli-lo. Além disto, também foram atestadas consequências de exposição aos altos níveis de material particulado nos sistemas cardiovascular e nervoso (KAMPA E CASTANAS, 2008).

O NO<sub>2</sub>, segundo Baird (2002), é o responsável pela transformação química que gera o ozônio (O<sub>3</sub>). Segundo o autor, o primeiro poluente tem como fonte principal a queima de combustíveis fósseis por veículos. Baird ainda cita uma grande influência dos ventos na dispersão deste poluente, e aponta uma ligação direta entre o tráfego de veículos e a sua concentração.

De acordo com Schirmer e Lisboa (2008) o NO<sub>2</sub> é altamente sensível à luz e radiação, sofrendo o processo de fotólise (quebra de sua composição química em decorrência da ação da radiação). Esse processo tem como resultado a dissociação da molécula de NO<sub>2</sub> em NO e um oxigênio atômico, que tem a possibilidade de reagir com o O<sub>2</sub> da atmosfera e com compostos orgânicos voláteis (VOC), formando o O<sub>3</sub>, outro poluente.

Segundo Seinfeld e Pandis (2006), para a formação do O<sub>3</sub> é necessário um dado equilíbrio entre NO<sub>x</sub> e VOC's, assim, altos níveis de NO<sub>x</sub> não representam necessariamente altos níveis de O<sub>3</sub>.

Os autores apontam ainda a existência de uma relação entre os níveis de ozônio e PM<sub>10</sub>, sendo que, o alto nível de material particulado pode diminuir a formação de O<sub>3</sub> em função de interações entre PM<sub>10</sub> e a radiação solar.

Castelhano (2017) apontou uma relação inversa entre a oscilação temporal dos poluentes NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>. Analisando a oscilação do poluente na região central de Curitiba, destacou-se que os horários de maiores níveis de NO<sub>2</sub> ocorreram em momentos de baixa concentração de O<sub>3</sub> e o inverso se sucedeu, com os picos de O<sub>3</sub> ocorrendo nas horas de menor concentração de NO<sub>2</sub>.

Tal fato é esperado e foi registrado em estudo semelhante ocorrido em Barcelona por Filella e Peñuelas (2006). Neste estudo, os autores apontaram a relação química entre NO<sub>2</sub> e outros óxidos de nitrogênio e o ozônio troposférico, como justificativa para tal relação. Portanto, o tráfego acaba tendo uma relação indireta com a formação de dito poluente.

Analisando a atmosfera de Houston, estado do Texas nos E.U.A, Kleinman et al., (2002) apontam uma relação clara entre os VOC's e o NO<sub>x</sub> na cidade com as concentrações de O<sub>3</sub>. Segundo os autores, as localidades mais próximas as indústrias petroquímicas apontaram os maiores valores de VOC's na atmosfera, fruto direto da emissão deste tipo de indústria, e por consequência também dos altos valores de O<sub>3</sub>.

Em outro estudo realizado em São Paulo, Carvalho et al. (2015) apontaram o poluente (O<sub>3</sub>) como o único com tendências ao aumento quando comparados aos demais. Os autores apontam, entre outros motivos, o crescimento na utilização de etanol como combustível, em função da expansão da frota de veículos com motores *flex*. Segundo sugerem os pesquisadores, a queima do etanol está elevando os níveis de VOC's na cidade, aumentando também, a produção do poluente.

Tal fato foi corroborado por Salvo e Geiger (2014) ao reportarem uma diminuição nos níveis de Ozônio troposférico em pontos específicos da cidade de São Paulo, como consequência de uma redução na queima de etanol e sua troca pela gasolina, sendo a causa o aumento dos preços deste combustível no período analisado.

Concentrações elevadas de O<sub>3</sub> são altamente danosas à saúde humana, afetando principalmente o sistema respiratório (ESTEVES et. al., 2012 e

LIPPMANN, 1989). Já os efeitos do NO<sub>2</sub> sobre a saúde humana foram debatidos em Grazuleviciene et al., (2004), que traz a relação entre os níveis deste poluente e os problemas nos sistemas respiratórios, circulatórios e, principalmente, cardiovasculares.

A seguir os componentes do “Sistema Poluição Atmosférica” serão destrinchados e analisados separadamente.

### I.1 *INPUTS* DETERMINANTES DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA”

Conforme abordada anteriormente a definição dos *inputs* determinantes no âmbito da metodologia utilizada na presente pesquisa, retoma-se que tais elementos se situam como aqueles ligados diretamente a gênese do problema em questão, no caso, as fontes emissoras de poluentes.

A má qualidade do ar está intrinsecamente ligada aos processos de urbanização, responsável direto pelo índice de poluentes emitidos. Em relatório divulgado pela *Environmental Protection Agency* (EPA), a agência de proteção ambiental Norte-americana, denominado *Improving Air Quality Through Land Use Activities* (2001), verificou-se a forte influência entre as feições e funções urbanas, tais como transporte e deslocamento de cidadãos, com o acúmulo de contaminantes na atmosfera.

A tabela 1 traz algumas destas feições e funções em termos de emissões, apontando os fatores que compõe as fontes de poluição atmosférica. Além da primeira divisão citado por Derisio (2012) entre naturais e antrópicas, as próprias antrópicas podem ser subdivididas entre fixas (indústrias, queima de resíduos, etc.) e móveis (proveniente de veículos, sobretudo, automotores), além dos poluentes secundários gerados como consequência de reações químicas entre poluentes e outros componentes da atmosfera.

Estimar com precisão a influência que cada um destes processos pode ter na qualidade do ar, e mesmo o raio de atuação destes fatores, é uma questão complexa dada a grande quantidade de variáveis aqui analisadas (PHILLIPPE, 2004).

Apesar disto, as zonas do entorno das grandes fontes, seguem sendo as principais áreas de risco. Awan et. al., (2011) apontaram as zonas industriais da cidade de Islamabad no Paquistão como as piores, no que diz respeito à

PTS, para a qualidade do ar. Segundo os autores, apesar de serem indústrias de pequeno porte, a quantidade de poluentes nestas zonas supera as localidades residenciais. As regiões próximas as grandes vias de tráfego também foram registradas com altos índices de poluição, apresentando valores sempre acima do limite estipulado.

Em estudo realizado na região Sul da Califórnia, nos Estados Unidos, Chow et. al., (1994) apontam uma “geograficidade” da poluição atmosférica, também trazida em Awan et. al., (2011) como um fator chave para a interpretação e tomada de decisões acerca da temática.

**TABELA 1-** Principais Fontes de Poluição Atmosférica e seus Poluentes.

Fontes		Poluentes
Fontes Fixas	Combustão	Material particulado, dióxido de enxofre e trióxido de enxofre, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio.
	Processos Industriais	Material particulado (fumos, poeiras, névoas), gases – SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , HCl, hidrocarbonetos, mercaptanas, HF, H <sub>2</sub> S, NO <sub>x</sub> .
	Queima de Resíduo Sólido	Material particulado, gases – SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , HCl, NO <sub>x</sub> .
	Outros	Hidrocarbonetos, material particulado.
Fontes Móveis	Veículos Gasolina/Diesel	Material particulado, monóxido de carbono,
	Álcool, Aviões, Motocicletas, Barcos, Locomotivas, etc.	Óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, Dióxido de enxofre, ácidos orgânicos.
Fontes Naturais		Material particulado – poeiras Gases – SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO, NO, NO <sub>2</sub> , Hidrocarbonetos.
Reações Químicas na Atmosfera Ex.: hidrocarbonetos + óxidos de Nitrogênio (luz solar)		Poluentes secundários – O <sub>3</sub> , aldeídos, ácidos.

Fonte: EEA (2013) Org.: Castelhana (2019).

Por meio de análises químicas, os autores constataram as diferentes constituições de poluentes captados ao longo da cidade de Los Angeles e municípios vizinhos. Assim, em pontos próximos a praia, o teor de sódio nas partículas era maior, já em zonas próximas ao perímetro industrial se sobressaíam os índices de enxofre.

Ao fim, os autores mencionam ainda a sazonalidade climática como uma



condicionante crucial na dispersão ou concentração de tais elementos, apontando as épocas de verão como as de maior nível de dispersão, e as de outono/inverno como as de maior concentração.

Estudo semelhante foi realizado no Chile. Romero et. al., (1999) explicitam a relação entre poluentes, dinâmica atmosférica e o uso do solo em Santiago onde, de acordo com os autores, as zonas desflorestadas e industriais da cidade são os grandes redutos para a má qualidade do ar.

É sugerida ainda, uma tendência de aumento no número de poluentes atmosféricos, tendo em vista a expansão urbana da cidade atribuída à boa condição econômica na época em que a pesquisa foi realizada.

Utilizando técnicas de SIG, Sulaiman et. al., (2017) relacionam a dispersão de Ozônio no vale do Klang, na Malásia, com o uso e cobertura do solo. Os autores indicam as áreas urbanizadas mais adensadas como os *hotspots* do poluente, e apontam ainda, altos valores para áreas rurais no entorno das cidades como reflexo direto destes registros.

Na área de estudo desta pesquisa, Danni-Oliveira (2000) realizou campanhas de monitoramento nos eixos estruturais de Curitiba, nos quais o desenvolvimento da cidade é pautado. Nestes eixos foram escolhidos vinte e seis pontos de coleta, que representassem os diferentes bairros da cidade em diferentes pontos.

Ao fim das coletas, a pesquisadora analisou que os locais onde o fluxo de veículos é elevado apresentaram uma maior concentração de material particulado em suspensão e de dióxido de nitrogênio.

A interferência dos atributos de uso de solo nos locais analisados também teve clara relação nos índices de poluição. Segundo a autora, a região da Cidade Industrial de Curitiba (CIC), que apresentava maior índice de industrialização, expôs os maiores índices de deposição ácida na forma de  $SO_4$ , já a região rural de São José dos Pinhais, município a Leste de Curitiba, obteve baixos índices em todas as espécies analisadas.

De maneira geral, a literatura situa a proximidade com as fontes emissoras (principalmente regiões industriais e as vias de maior tráfego) como as regiões onde se concentram os maiores níveis de poluição.

Fontes naturais de poluição como cinzas de vulcões, areia, sal ou pólen, são tratados como casos específicos e não serão abordados nesta tese, por não se aplicarem à área de estudo.

A saída das indústrias das regiões mais densamente urbanizadas, rumando a áreas periféricas próximas aos grandes centros, configura-se no que Gutjahr (2002) aponta como, um processo de distribuição global de indústrias para locais cujos ambientes ainda não estejam saturados, e, onde a poluição ainda não é vista como um problema principal. É o caso do desenvolvimento industrial de Araucária, no Aglomerado Urbano de Curitiba.

Em estudo realizado por Andrade et. al., (2012), e mencionado na introdução desta pesquisa, remete-nos a este fato, ao trazer que, do material particulado coletado em Curitiba apenas 13% tem sua origem nas emissões industriais. Tal é consequência da concentração industrial na região Sudoeste do Aglomerado Urbano, mais especificamente no município de Araucária.

Muitos dos fatores determinantes supracitados convergem para uma discussão sobre os processos de produção do espaço urbano e planejamento urbano deficitário, sobre o qual passam as grandes cidades, principalmente em países em desenvolvimento (MAYER, 1999).

Harvey (2016) aponta o processo de urbanização como um fenômeno regido por duas forças contraditórias em relação ao uso da terra: o valor de troca, estabelecido pelo mercado imobiliário e o valor de uso, compreendido como a real necessidade da população.

Para o autor, nos processos de produção do espaço urbano nas cidades capitalistas atuais, a balança tende a pender, sobretudo para o valor de troca, criando, conforme Guerra (2014) cidades não mais voltadas para as reais necessidades humanas. Neste ponto, entendem-se muitos dos problemas ambientais observados nas cidades contemporâneas.

Neste ponto, pode-se resgatar o conceito de urbanização corporativa de Santos (1993), muito semelhante a explanação de Harvey. O autor concebe a ideia do Estado como o responsável por nortear os processos urbanísticos do país, sobrepondo às necessidades de uma minoria corporativa e rica, ante a uma maioria pobre, e justificando assim, as contradições sociais tão facilmente observadas em qualquer cidade de porte médio ou superior do Brasil.



Em ambas as ideias, vê-se o Estado como uma figura central na dinâmica urbana, acabando este, por adquirir um papel ímpar na produção do espaço urbano, e, segundo Correa (1995), refletindo diretamente as dinâmicas da sociedade o qual representa e dispondo de um conjunto de instrumento legais que pode empregar ao espaço.

Estas características perpetuam o Estado como um dos principais agentes no processo de urbanização e produção do espaço urbano, sendo, portanto, um dos responsáveis pela intensidade e localização dos *Inputs* determinantes na lógica espacial da qualidade do ar.

#### I.1.1 *Inputs* Determinantes no AUC

Focando a metodologia apresentada para a área de estudo em questão, buscar-se-á a seguir analisar Curitiba e o seu Aglomerado Urbano, sob o espectro de seus *Inputs* determinantes, dando ênfase ao seu processo de industrialização e crescimento urbano, uso do solo e funções urbanas. Entende-se que a assimilação destes fatores no âmbito da área de estudo é fundamental para a espacialização da qualidade do ar, estas que embasarão as técnicas e resultados a serem apresentados no capítulo II.

Na área de estudo, o Estado é apontado como grande responsável pelos processos de industrialização e consequente expansão da mancha urbana da região após os anos 1970. (FIRKOWSKI, 1997; SILVA, 2006). Observa-se que, apesar de uma intensa propaganda aclamando o planejamento da cidade, o mesmo não fugiu a lógica corporativa proposta por Milton Santos e já mencionada anteriormente (POLLI, 2007).

A tabela 2 aponta um progressivo e volumoso processo de crescimento populacional na capital paranaense com destaque para o período dos anos 1960 aos anos 1980, quando a mesma passa de 360 mil para mais de 1 milhão de habitantes.

No que tange a questão urbanística de Curitiba, observa-se o plano Serete, desenvolvido em 1964 e aplicado nos anos 1970, como o grande responsável pela forma e morfologia atual da cidade (SANTOS, 2014).

Dito plano urbanístico organizou o município através do tripé: Sistema Viário, Uso do Solo, e Transporte Público, e propôs a criação de eixos

estruturais com zoneamento específico, como grandes Norteadores de seu desenvolvimento.

**TABELA 2** – População Total e Crescimento Percentual da População de Curitiba. 1940 – 2010.

ANO	1940	1950	1960	1970	1980	1991	2000	2010
<b>POP. TOTAL</b>	140.665	180.575	361.309	624.362	1.025.979	1.315.035	1.587.315	1.751.907
<b>CRES. POP. (%)</b>	-	28,4	100,1	72,8	64,3	28,2	20,7	10,4

FONTE: IBGE (2010) Org.: Castelhana (2019).

Estes eixos consistem em três vias paralelas; a central possui faixas exclusivas para ônibus e as laterais são denominadas rápidas, com quatro ou mais vias de rolamento em apenas um sentido (Figura 9).

**FIGURA 9-** Eixo Estrutural de Curitiba



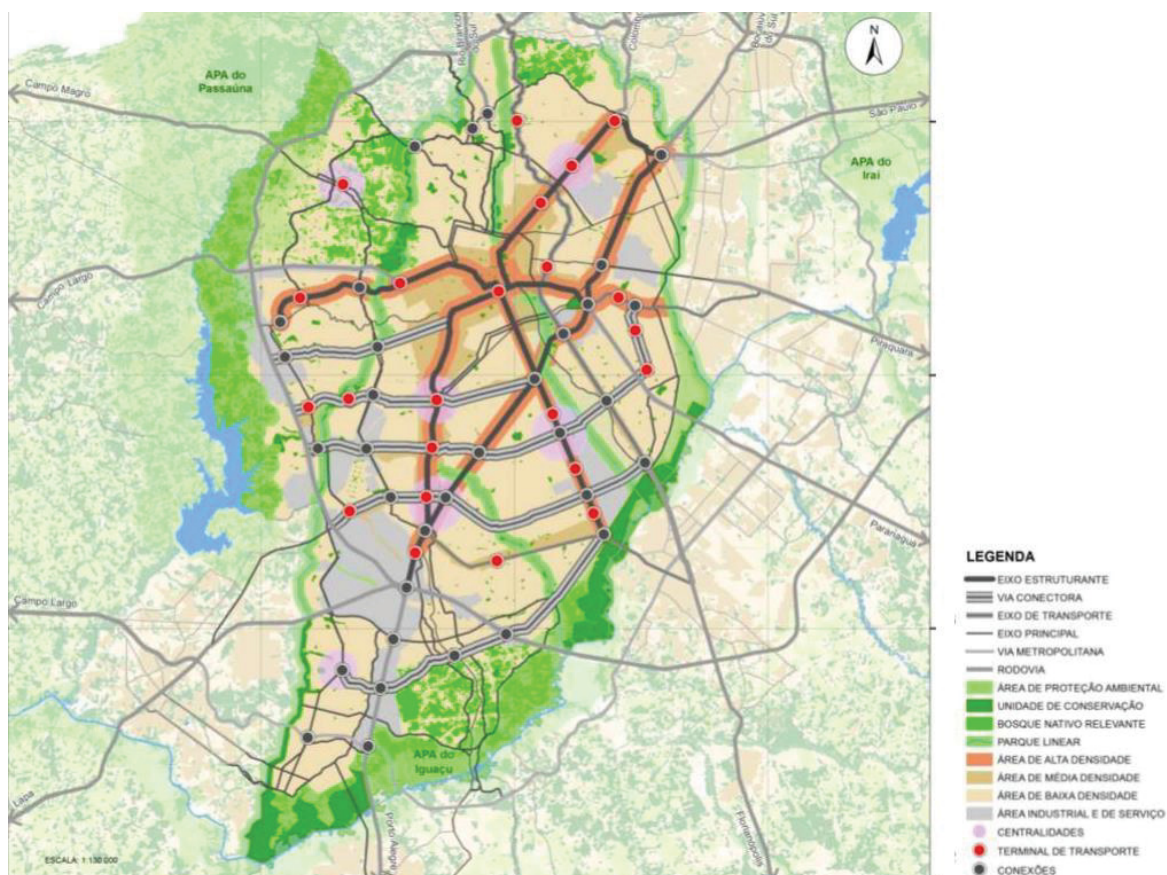
FONTE: URBS (2016).

Sobre as vias estruturais Santos (2014) aponta:

A função habitacional viabilizada pelos eixos estruturais cria verdadeiros paredões de edifícios nas quadras junto a esses eixos, promovendo a mescla de usos na qual predominam os usos habitacionais comerciais.[...] No que se refere à ocupação do lote, a legislação do Setor Estrutural não estabelece limitação de altura ou condicionantes como orientação axial e latitude, por conseguinte as condições de iluminação são bastante prejudicadas e a incidência solar em situações mais extremas como durante o período de inverno fica totalmente comprometida [...]. (SANTOS, 2014, p. 168).

Assim, do centro de Curitiba partem cinco eixos estruturais com seus respectivos BRT's, nos sentidos Sul (Av. Sete de Setembro e Av. República Argentina), Oeste (Rua Padre Anchieta e Rua Deputado Heitor Alencar Furtado), Leste (Av. Presidente Afonso Camargo), Norte (Av. João Gualberto e Av. Paraná) e Sudeste (Av. Mal. Floriano Peixoto). Mais recentemente, foi realizada a reestruturação da antiga BR-116 para transforma-la em um novo eixo estrutural da cidade denominado Linha Verde. Na figura 10 é possível visualizar os eixos supracitados destacados pela cor vermelha.

**FIGURA 10-** Eixos Estruturais de Curitiba



FONTE: IPPUC (2015).

No entanto, conforme apontado por Oliveira (2014), o plano original dos eixos estruturantes diferenciava-se em alguns pontos da explanação de Santos (2014). Segundo o autor, a lei original de zoneamento do plano Serete previa até três torres de no máximo 15 andares em cada quadra, centradas em terrenos densamente arborizados.

Oliveira (2014) explica que a partir dos anos 1980, a lei de zoneamento e uso do solo de Curitiba passou por revisões, em decorrência de pressões diretas de entidades privadas ligadas a construção civil e comércio do Paraná, e a partir desta década passa-se então a permitir um maior adensamento nestas áreas, facilmente observado nos dias de hoje.

O adensamento urbano nos eixos traz consigo uma concentração de circulação de veículos nestas vias e em vias próximas. Se mais pessoas e serviços se concentram nestas áreas, espera-se que a circulação veicular também aumente.

Aliado a este fato está o seu formato radial, que concentra a ligação entre os eixos na região central da capital, tornando esta região um ponto nevrálgico no que tange a mobilidade urbana de Curitiba e com grande concentração de fontes emissoras de poluentes.

Analisando a porção central de Curitiba, Castelhana (2017) destaca a intrínseca relação entre o fluxo de veículos e a oscilação de poluentes. Observando o volume de tráfego oriundo de quatro radares de velocidade próximos a uma estação de monitoramento da qualidade do ar, o autor aponta uma relação direta entre os níveis de NO<sub>2</sub> e PTS com a quantidade de veículos na rua. No caso do dióxido de nitrogênio, o autor esclarece que o intervalo entre a emissão do veículo e a detecção da estação de monitoramento é menor, fazendo com que o pico de NO<sub>2</sub> esteja mais próximo temporalmente do pico de veículos quando comparados com o PTS.

A intensificação de construções devido à permissibilidade da lei de zoneamento no entorno destas vias estruturais teve consequências ambientais graves, já atestadas por Danni-Oliveira (2000) e Bender e Dziedzic (2014) ao apontar a formação de micro *canyons* e dificuldade na circulação de ventos em ditos locais.

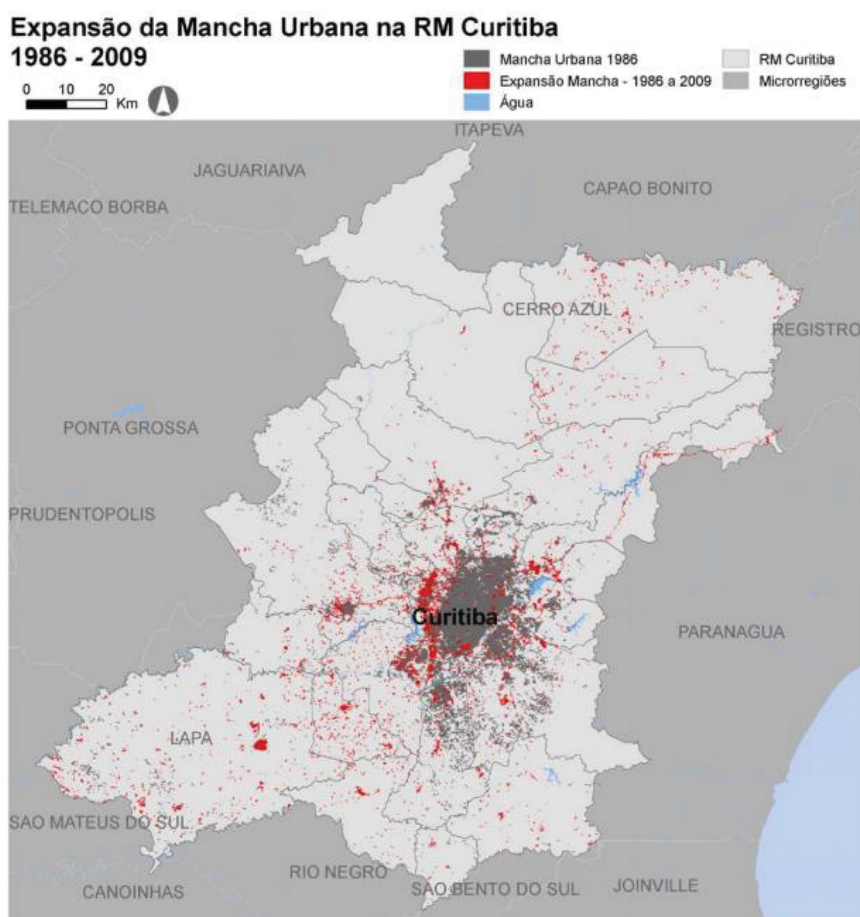
Em trabalho sobre a expansão de Regiões Metropolitanas pelo Brasil e suas relações com aspectos legais da proteção ambiental, Galvão (2011)



evidencia uma ampla expansão da mancha urbana de Curitiba para os setores Sul e Oeste. A figura 11, presente na obra do autor, aponta tal crescimento em comparação a mancha urbana mapeada em 1986, através de imagens Landsat 5.

Para o autor, isso é uma característica geral da expansão urbana de grandes centros no Brasil, onde dito processo se dá para áreas cada vez mais distantes do centro, e por consequência com preços tangíveis para as populações de baixa renda, porém, igualmente inadequadas para habitação, devido, entre outros motivos, a presença de rios, mananciais, áreas de preservação ou falta de infraestrutura adequada.

**FIGURA 11** - Região Metropolitana de Curitiba - Expansão da Mancha Urbana, 1986-2009



FONTE: GALVÃO (2011).

Segundo Silva (2014), observou-se em Curitiba, principalmente a partir dos anos 1980, uma periferização da pobreza, sendo que as populações de mais baixa renda passam a ocupar as franjas da capital, vivendo mais distante do centro e em locais com pouca ou nenhuma infraestrutura.



A figura 13 apresenta os resultados de um modelo de tráfego de veículos elaborado pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba em 2016 aponta as vias com fluxo mais intenso de veículos.

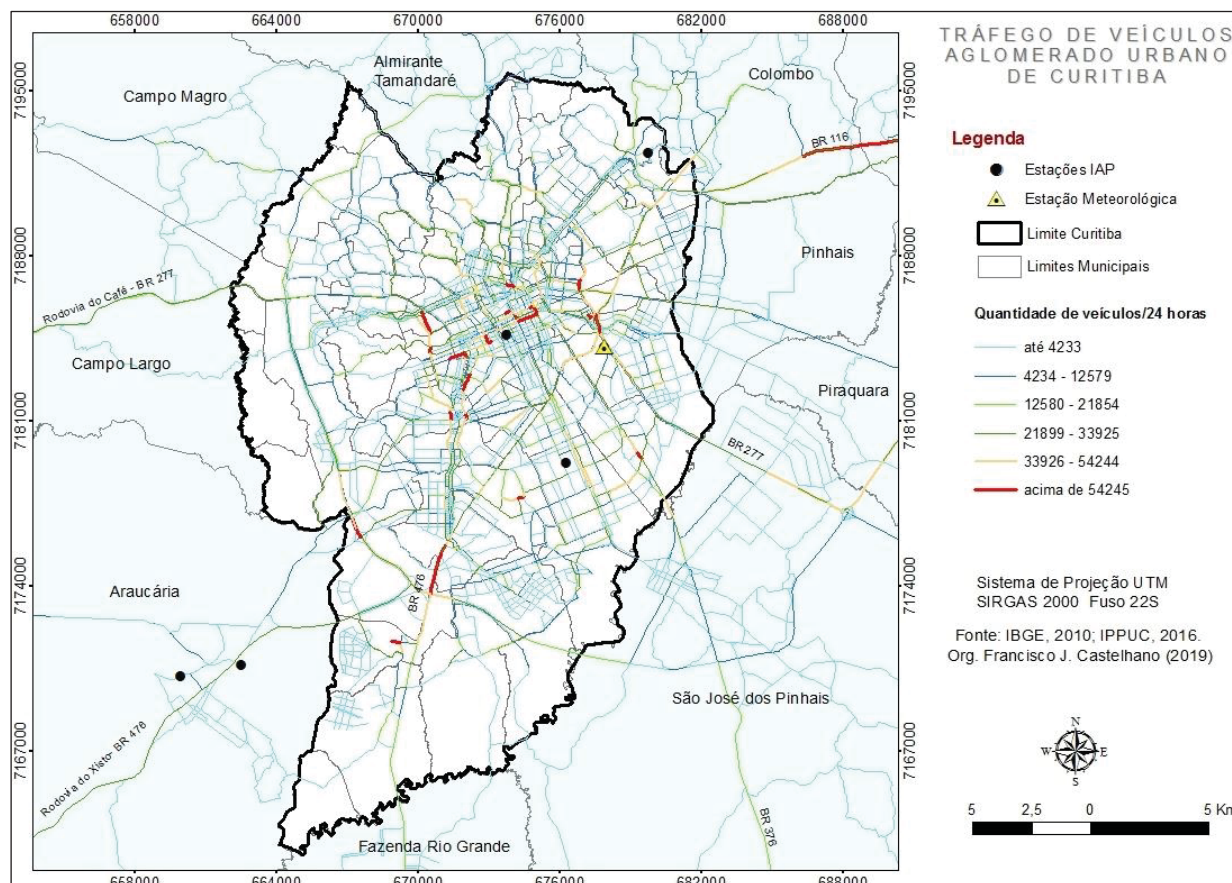
Percebe-se o papel do centro como agregador e das rodovias no entorno da cidade como as regiões por onde mais transitam veículos.

Saldiva (2012) por outro lado, salienta que, os sucessivos programas públicos de redução de emissões veiculares vêm mostrando resultados, onde apesar do intenso fluxo de veículos, as regiões centrais apresentam quedas nos níveis de poluentes, principalmente de SO<sub>2</sub>. Ele explica que programas estatais estão exigindo, progressivamente, reduções nos fatores de emissão dos veículos que circulam pelo país.

Retornando à expansão urbana, este aspecto também foi ressaltado por Deschamps (2004) ao apontar que, as localidades populosas e povoadas e para onde se expandiu a mancha urbana de Curitiba, estão entre as mais vulneráveis no âmbito socioambiental na Região Metropolitana de Curitiba.

Um exemplo disso encontra-se na expansão da mancha urbana para as áreas Sul e sudeste da capital, principalmente no bairro CIC. Segundo Oliveira (2004) este bairro foi criado em 1973, iniciando-se com um amplo processo de desapropriação de terrenos nesta região da cidade.



**FIGURA 13—** Modelo de tráfego de Veículos para Curitiba

FONTE: IPPUC (2016). Org.: Castelhana (2019).

Coube ao município em parceria com o governo do Estado urbanizar e organizar a região, inserindo toda a infraestrutura necessária para a instalação das indústrias (água, esgotos, eletricidade, construção de vias, etc.). As mesmas indústrias, ainda conforme aponta Oliveira (2004) receberam isenções fiscais como forma de incentivo.

Segundo este autor, os preços de revenda das terras na CIC na época de sua construção foram abaixo dos valores de mercado e insuficientes para ressarcir os gastos do Estado em sua implementação, trazendo um grande endividamento para o município de Curitiba.

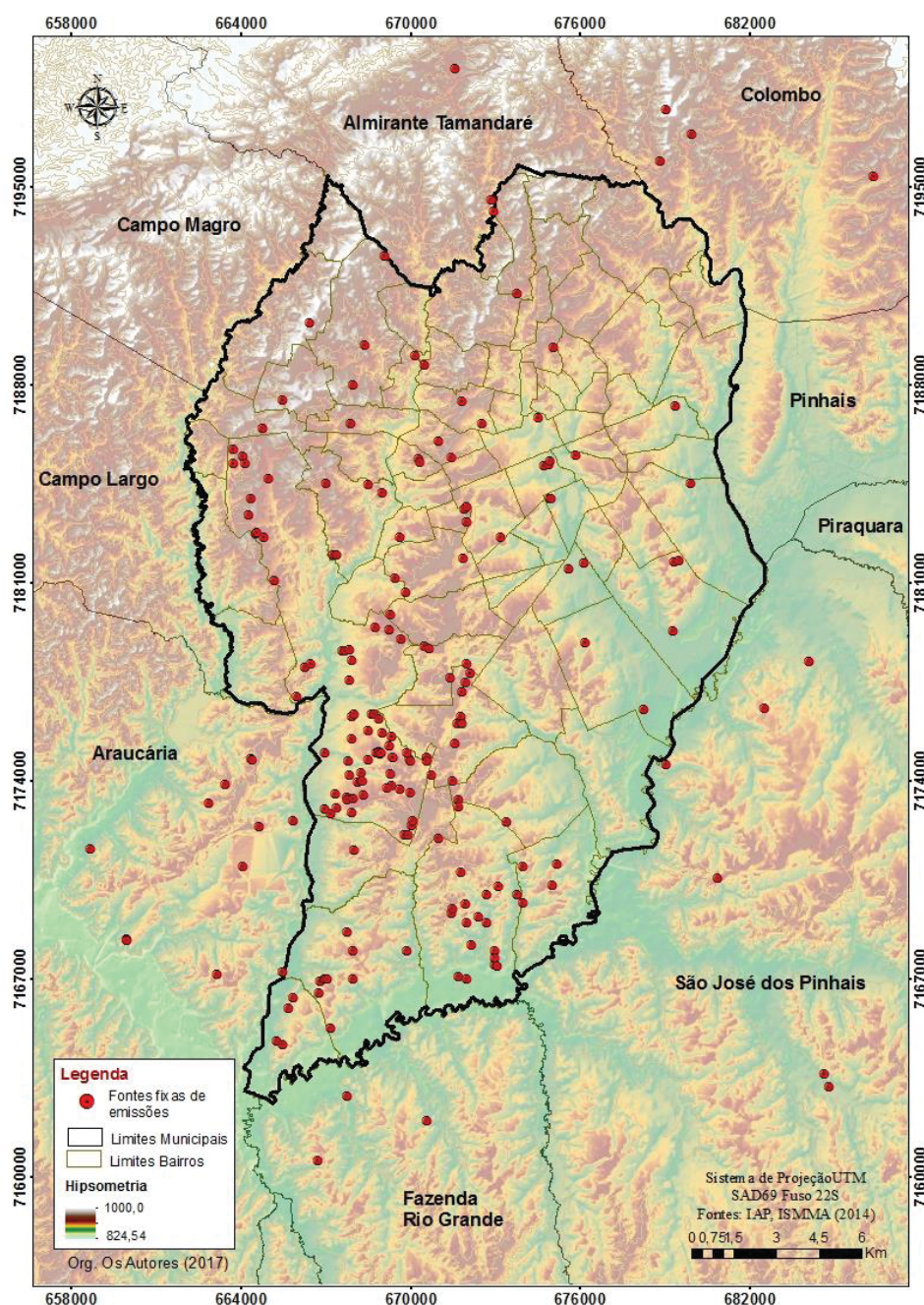
É importante salientar, após a criação da CIC, a grande influência da recente classe industrial curitibana na definição dos rumos que a cidade tomava. Oliveira (2004) aponta a formação da Associação dos Empresários da Cidade Industrial de Curitiba como uma entidade voltada a representar dita classe junto aos poderes públicos. Para o autor, é neste momento que se forma uma aliança entre setores empresariais e a elite do planejamento urbano de Curitiba.

A Figura 14 aponta a localização das fontes fixas existentes na região metropolitana e os inventários de poluição publicados pelo IAP e pela Secretária Municipal de Meio Ambiente de Curitiba, ambos datados de 2013.

Observa-se uma grande concentração na porção Sul e Sudeste do AUC, onde se localizam a CIC e a CIAR. A região Oeste da capital é outro ponto em que se encontram algumas fontes, na região Norte do bairro CIC. A região central de Curitiba já não conta com muitas fontes fixas, o pouco que ainda resta na região situa-se no bairro Rebouças, antigo polo industrial curitibano.

Comparando os mapas das figuras 11, 12 e 14, pode-se observar que os locais os quais se observaram o crescimento da mancha urbana são também os locais em que se concentram as maiores fontes emissoras, nas regiões ao Sul e sudoeste da porção central da região central de Curitiba.

**FIGURA 14**– Curitiba e entorno - Localização das Fontes Fixas de Emissão de Poluentes



FORNTE: IAP (2013) e SMMA (2013).

## I.2 INPUTS CONDICIONANTES DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA”

Os elementos tidos como *inputs* condicionantes são aqueles que, regulam, moderam ou potencializam a dispersão e diluição dos componentes poluidores do ar. Reitera-se que os componentes aqui apresentados não são os responsáveis diretos pelos altos níveis de poluição nas localidades.



Optou-se pela divisão entre os elementos condicionantes naturais e os sociais ou construídos.

Abordando os elementos naturais, em relação à capacidade de diluição ou dispersão dos poluentes, observa-se que as condições meteorológicas assumem aqui papel fundamental sendo que, os tipos de tempo observados em um dado sítio podem ser definidos como peça crucial no entendimento da dispersão ou concentração de poluentes atmosféricos (HUFTY, 2001; MCCORMAC, 1971).

Derisio (2012) aponta a precipitação, temperatura e ventos como os aspectos que mais podem influir nos processos acima citados. Segundo o autor, a precipitação tem a capacidade de "lavar" o ambiente ao auxiliar na questão da deposição de poluentes.

A temperatura auxilia na formação de correntes convectivas, que, conforme já demonstrados na Figura 8, auxiliam na elevação e dispersão de partículas, e por fim os ventos exercem um claro papel também na dispersão, sendo que, quanto, mais estáveis, maiores as chances de não ocorrerem transportes, e, portanto, de se acumularem poluentes em um único sítio.

Contudo, as inversões térmicas acabam sendo os fenômenos meteorológicos mais ligados a problemas na qualidade do ar. Em situações atmosféricas comuns, tem-se um decréscimo gradual na temperatura do ar, à medida que a distância do solo aumenta. Tal fato ocorre pela transmissão de calor do solo, aquecido pela radiação solar, para o ar. O aquecimento, e consequente expansão do ar, o torna menos denso, fazendo com que o mesmo se eleve, enquanto que o ar mais frio e mais denso tem movimento oposto, em um movimento denominado convectivo (BRANCO E MURGEL, 2004).

Tal situação se modifica em situações de tempo frio, como em épocas de inverno. Durante a noite, a superfície perde calor com mais facilidade, deixando as camadas inferiores da atmosfera mais frias.

Após o amanhecer, os raios solares não são suficientes para esquentar as camadas mais baixas e impedem os movimentos convectivos previamente explanados, causando imobilidade na atmosfera e retenção de poluentes sobre a área urbanizada (Figura 15).

Estes fatores tiveram sua importância reiterada por Kartal e Ozer (1998), que situam também, a forte influência da umidade relativa do ar na manutenção de uma boa qualidade do ar.

Segundo os autores, altos índices de umidade tendem a ter como consequência, baixos níveis de poluentes uma vez que, este fator corrobora para a absorção e deposição de poluentes atmosféricos.

**FIGURA 15-** Curitiba/PR - Inversão Térmica



FONTE: Acervo do Autor (Ago/2016)

Tal fato mostra-se controverso, visto que, Akpinar et. al., (2009) apontaram relação oposta entre níveis de umidade relativa do ar e PTS e  $\text{SO}_2$  na região Leste da Turquia.

Os autores encontraram uma relação inversa entre temperatura e velocidade do vento com os níveis de poluentes, contudo a relação com a umidade foi positiva, indicando neste caso, que níveis mais altos de umidade propiciavam piores condições em termos de qualidade do ar.

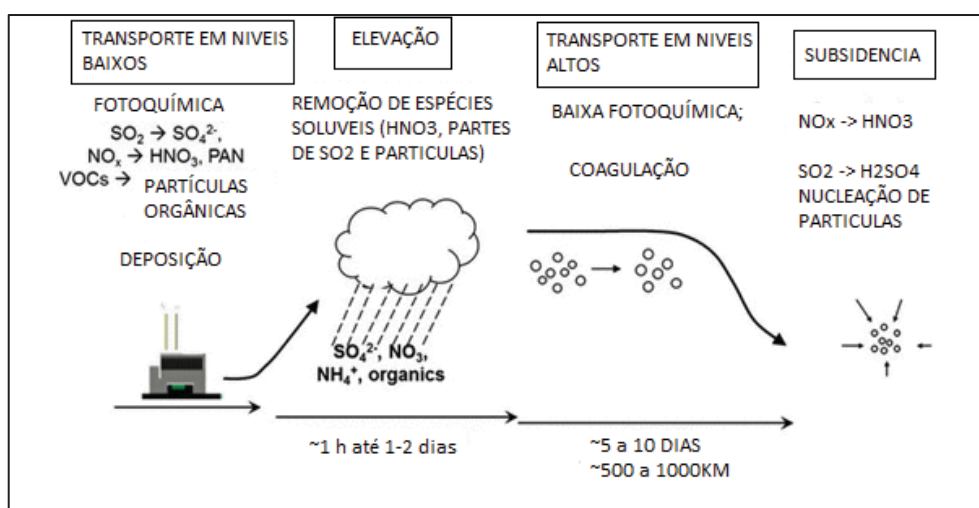
Em outro estudo realizado em Poznan, na Polônia, Czernecki et. al. (2017) relacionam as variações em várias escalas temporais de  $\text{PM}_{10}$  com variáveis meteorológicas. Utilizando-se de uma série temporal de 2005 a 2013, os autores detectaram uma significativa correlação negativa entre o poluente e a velocidade do vento e a temperatura.

Os ventos estão entre os principais responsáveis pelos processos de dispersão de poluentes. Segundo Schlager et. al., (2012) existem quatro momentos no transporte de poluição (Figura 16), o primeiro ocorre na emissão,

em seguida, tem-se a elevação de parte destes poluentes, fruto de correntes convectivas quentes, este ponto se dá em um período que varia entre uma hora a até dois dias após a emissão, e é quando ocorre a remoção de químicos solúveis e algumas partículas físicas ainda remanescentes.

O terceiro momento se dá em altitudes mais elevadas, o qual as partículas de tamanho pequeno, aliadas a baixa ação fotoquímica, se dispersam, seguindo os fluxos de vento. Neste ponto as grandes distâncias são percorridas. Este processo se dá entre cinco e dez dias após a emissão, e pode levar partículas a uma distância de cerca de mil quilômetros do ponto de emissão a depender do tamanho da mesma.

**FIGURA 16-** Fases dos transportes de Poluentes pela atmosfera.



FONTE: Adaptado de Schlager et. al (2012).

Após tal período de constante, apesar de baixa atividade fotoquímica, chega-se ao quarto momento, em que as partículas passam por um processo de nucleação ou condensação, aumentando seu peso, seguido pela subsidência, quando voltam a decair sobre as camadas mais baixas da atmosfera. Neste processo, podem se formar novos poluentes além dos antigos, sendo denominados poluentes secundários.

Outro exemplo desta dinâmica é trazido por Stravinskienė et. al., (2014), na Lituânia, onde a poluição gerada por apenas uma indústria, afetou o crescimento de árvores que se localizam entre 3 e 11 quilômetros de distância, um valor menor quando comparada ao esquema da figura 17, contudo relevante.

Voltando a tese de Danni-Oliveira (2000) sobre Curitiba, a autora deixa claro que não foi possível estabelecer uma relação direta entre a concentração de poluentes e os tipos de tempo ocorrido, no entanto seus resultados sugerem que os episódios mais críticos estavam associados ao domínio da Massa Polar Atlântica.

Outro fator temporal que apresentou forte relação com a dispersão de poluição foi a força e direção dos ventos. Segundo conclusão da autora, as situações em que a velocidade dos ventos foi menor, foram favoráveis à elevação dos índices dos poluentes monitorados em todos os locais analisados.

Ainda é possível citar a chuva como outro fator importante neste processo. Danni-Oliveira expõe que em 1998 as chuvas exerceram papel nivelador nos valores dos contaminantes, promovendo uma menor variabilidade dos mesmos.

O evento ocorrido em Cubatão nos anos 1980, que chegou a ser denominada “Vale da Morte”, onde pela poluição do ar, inúmeros foram os casos de nascimentos de crianças anencéfalos, também apresentou relação com fatores meteorológicos e geomorfológicos. Segundo Alonso e Godinho (1992), os primeiros episódios problemáticos foram registrados em 1984 e os de maior repercussão estão todos relacionados com fatores climáticos, como a presença de anticiclones tropicais semi-estacionários por vários dias, tornando a atmosfera estável e impedindo a dispersão dos poluentes.

Aliado a este fator, encontra-se o fato do parque industrial responsável pelas emissões ter sido construído no vale do Rio Cubatão, entre duas vertentes, portanto, uma área com gênese para pouca circulação.

Sobre a relação poluição/meteorologia em Paulínia, polo petroquímico no Estado de São Paulo, Gutjahr (2002) explana:

Os parâmetros meteorológicos interferem grandemente no comportamento, concentração e dispersão desses poluentes. A circulação dos ventos em superfície, sua direção e velocidade, a ocorrência de radiação solar, a precipitação atmosférica e a umidade relativa, a estação do ano, entre outros, todos contribuem para resultados diversos. (GUTJAHR, 2002).



Interessante salientar outra conclusão da autora, que menciona que é notável a melhora na qualidade do ar em finais de semana e feriados, mais relacionados a pouca circulação de veículos e menor atividade industrial.

Romero et. al., (1999) também associam os piores eventos de poluição, em Santiago, com a presença de anticiclones, aliados a inversões térmicas. Segundo os autores, o inverno é o período em que mais se registram tais eventos relacionados a material particulado.

Conclusão semelhante à de Romero foi sugerida por Monteiro (1989) para a cidade do Porto em Portugal. A autora aponta uma relação clara entre episódios extremos de poluição e a presença de anticiclones na região dada à dificuldade de dispersão. A autora também aponta uma marcante correlação entre baixas temperaturas e baixa qualidade do ar. Sua justificativa, contudo, sugere um aumento no uso de aquecimento por queima de lenha em períodos de baixa temperatura para justificar tal correlação.

Mesmo fato foi observado por Andrade (1996) em Lisboa, que apontou alta relação entre a presença de anticiclones, estabilidade atmosférica e baixos valores de velocidade do vento com níveis de  $\text{NO}_2$  e  $\text{CO}$ .

Assim, observa-se certo padrão temporal, que vai de acordo com a teoria de Derisio (2012) citada anteriormente, em que as épocas de outono/inverno são as, usualmente, mais propícias a eventos de má qualidade do ar, em função de suas características meteorológicas.

O caso de Cubatão, mencionado anteriormente, ilustra a relação existente entre a geomorfologia e a má qualidade do ar. Segundo Carvalho et. al., (2001) o principal cerne desta relação encontra-se na interferência do relevo sobre o fluxo de ventos e por consequência no fluxo de poluentes.

As pesquisadoras analisaram a dispersão de poluentes na costa atlântica da península ibérica, e atestaram a interferência indireta do relevo no fluxo e deslocamento de ar.

Ademais da interferência direta no fluxo de ventos, alguns estudos apontam ainda a influência do relevo na formação do chamado Efeito Föhn, nos níveis de poluição.

As massas de ar úmidas provindas do oceano, ao transpor uma grande barreira orográfica descendem sua temperatura, conforme as altitudes se

elevam, a diminuição na temperatura condensa a umidade presente na massa, e gera chuvas, as chamadas chuvas orográficas.

Após as precipitações, e a passagem da barreira, a massa de ar tende a se aquecer e torna-se mais seca, sendo este o chamado efeito Fohn. Estudos realizados por Li et. al., (2006) na China, Gunia et. al., (2008) no Uzbequistão e Kischka et. al., (2017) na região do mar morto, atestaram que os ventos secos e quentes, oriundos do efeito Fohn, aumentam os percentuais de poluentes atmosféricos em cidades próximas as montanhas. Os três estudos indicam que a baixa umidade do ar, em conjunto a alta temperatura dos ventos, aumenta as chances da ocorrência de inversões térmicas, dificultando a dispersão dos compostos emitidos pelas cidades.

Outro aspecto espacial condicionante para uma boa qualidade do ar está na presença de áreas verdes. Segundo Givoni (1991) a implementação de tais áreas tem uma influência direta e indireta na qualidade do ar. A direta diz respeito ao caráter filtrador da vegetação, sejam gases ou partículas de poeira, e o aspecto indireto, está no fato destas permitirem uma melhor ventilação dos espaços urbanos, garantindo a dispersão da carga de emissões nos grandes centros.

No âmbito dos *Inputs* condicionantes sociais, destacam-se o uso do solo, (que também reflete a cobertura vegetal e urbanização), fenômenos espaciais já abarcados anteriormente, e a verticalização.

Destaca-se o fenômeno da verticalização nas cidades, que compreende a construção e crescimento vertical de edifícios e estruturas.

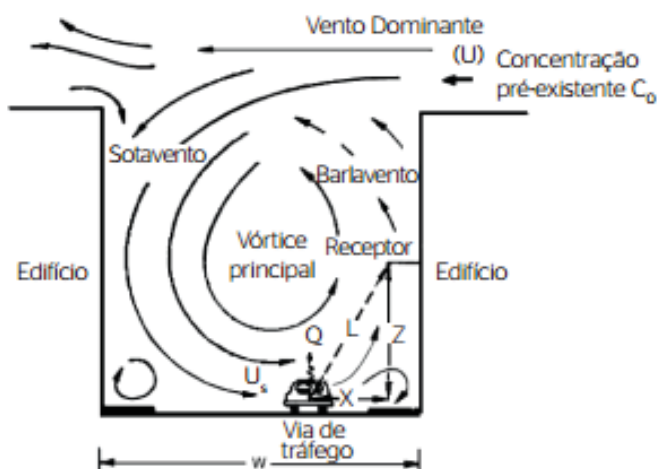
Tal formação é comum em cidades adensadas e modifica o fluxo de vento, não apenas pela formação de barreiras físicas, mas também pelo aquecimento das construções que o formam, alterando por diferença de temperatura a direção e fluxo de ventos em seu interior (SINI et. al., 1996 e OKE, 1978).

A proximidade de estruturas verticalizadas cria dinâmicas de vento muito particulares, que dificultam a dispersão dos poluentes gerados pelas fontes móveis que circulam ao “fundo” desta estrutura em formato de *canyon* (Figura 18), e construindo zonas de turbulência próprias das áreas de *canyons*.

Discutindo o efeito de *canyons* urbanos na cidade de Newcastle, na Inglaterra, Galatioto et. al., (2014) salientam que, além da altura dos edifícios, a

orientação da rua em relação a direção predominante dos ventos também influenciará na capacidade de dispersão do ambiente analisado.

**FIGURA 17-** Esquema em corte de um *Canyon* Urbano



FONTE: Adaptado de Bender e Dziedzic (2014).

### 1.2.2 Inputs Condicionantes no AUC

Analisando inicialmente os *inputs* condicionantes naturais no Aglomerado Urbano de Curitiba, constata-se que, em termos de geomorfologia, este elemento pouco ou nada contribui para a qualidade do ar da região, em decorrência de sua homogeneidade.

Segundo aponta Maack (2012) Curitiba encontra-se dentro da unidade morfo-escultural do Primeiro Planalto Paranaense, limitado a Oeste pela Escarpa Devoniana e a Leste pela Serra do Mar. O autor aponta que a altitude deste planalto é uniforme, formando uma longa extensão ondulada de cerca de 75 quilômetros.

Dentre as subunidades geomorfológicas, destacam-se as planícies fluviais que correm pela região Leste da capital, rumo à Araucária, seguindo o curso do Rio Iguaçu e os Planaltos do Alto Iguaçu, que percorrem do centro-Sul de Curitiba, até Araucária (ITCG,2008).

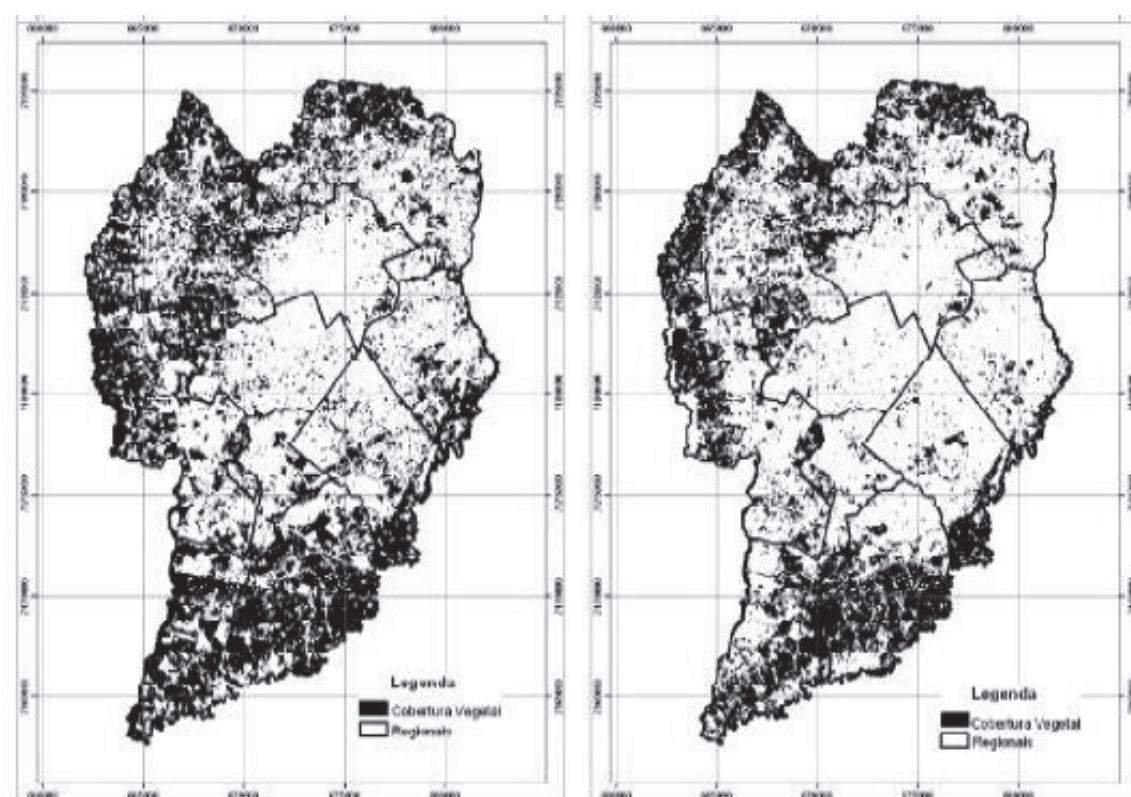
A cobertura vegetal de Curitiba, embora muito alterada pela ocupação e expansão de sua mancha urbana, alterna-se entre formações de Floresta Ombrófila Mista, descritas como formações próprias de regiões de clima mais temperado, onde se observa a presença de coníferas (principalmente da Araucária angustifolia) e estepes gramíneos lenhosas, classificadas como

regiões de vegetação baixa, com pequenos capões de floresta em pontos isolados, também próprias de climas temperados e subtropicais (IBGE, 2012).

Comparando a cobertura vegetal da capital entre os anos 1980 e a década de 2000 através do uso de imagens de satélite, Vieira e Biondi (2008) detectaram que o percentual de áreas verdes em Curitiba caiu de 36% de sua área total em 1986 para cerca de 30% em 2004.

Segundo as autoras, os bairros CIC, Bairro Novo e Pinheirinho na zona Sul, e Cajuru na zona Leste, estão entre os bairros da capital que mais perderam cobertura vegetal neste período.

**FIGURA 18** – Cobertura Vegetal em Curitiba – 1984-2004



FONTE: Vieira e Biondi (2008).

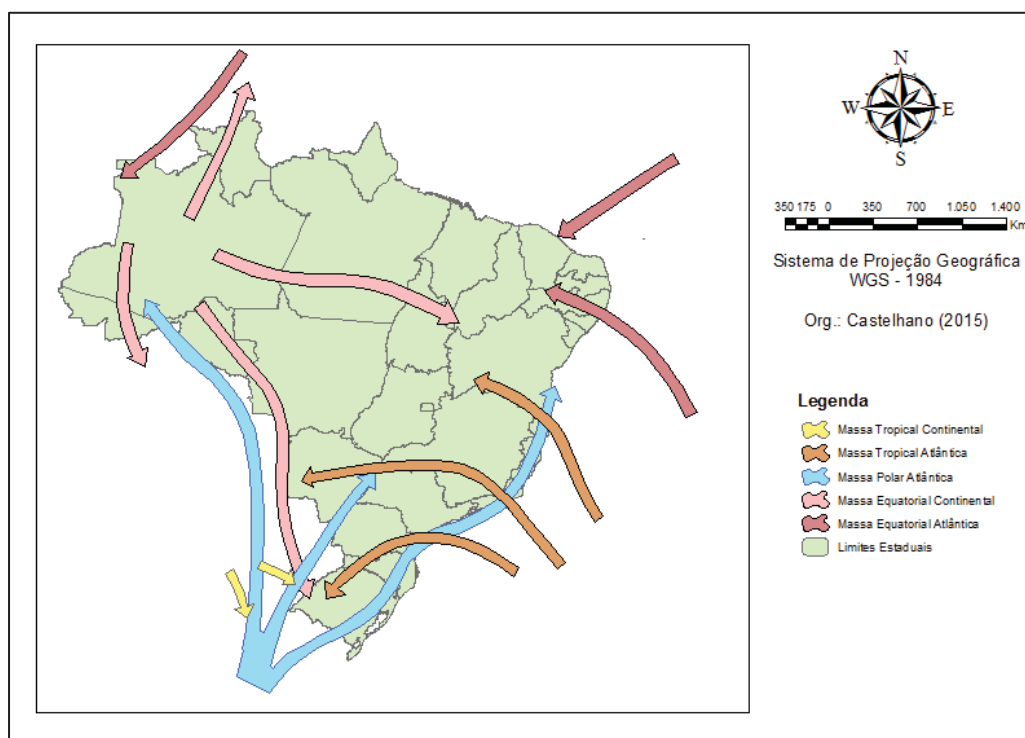
Conforme já mencionado, o crescimento urbano e industrial de Curitiba em direção a região Sul e a consequente diminuição da cobertura vegetal nesta área é apontada pelas autoras como fruto direto desta expansão.

A mesma região foi referenciada anteriormente como o local em que as fontes fixas de emissão mais se concentram. A retirada da cobertura vegetal nesta área, conforme constatado, pode, segundo a literatura mencionada no subcapítulo anterior, potencializar o acúmulo de poluentes, tanto pelo caráter

filtrador da vegetação quanto pela criação de barreiras que dificultam a circulação de ventos.

Em relação ao clima, Mendonça e Danni-Oliveira (2007) o classificam na área de estudo, como subtropical úmido com inverno frio. Conforme se observa na figura 19, o clima desta região é regido principalmente por massas de ar tropical (Atlântica e Continental) e polares (Atlânticas), sendo que no verão é possível observar ainda a atuação da Massa Equatorial Continental.

**FIGURA 19:** Brasil: Massas de Ar atuantes.



FONTE: Adaptado de Mendonça e Danni-Oliveira (2007).

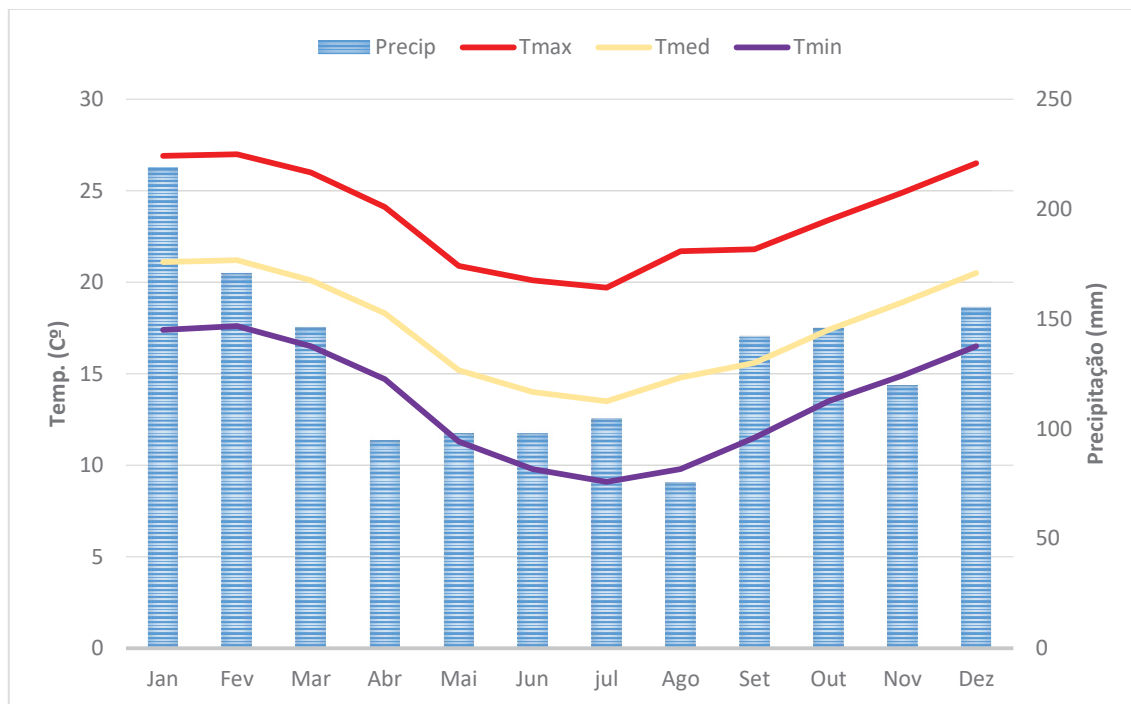
Os autores citam que as características mais marcantes deste tipo de clima são a constante distribuição pluviométrica ao longo do ano em conjunto a baixas temperaturas no inverno. A região de Curitiba tem aliada a este fator, a sua altitude, o que acentua as baixas temperaturas no local. A Figura 20 ilustra as normais climatológicas de Curitiba segundo o INMET.

Observa-se que a cidade tem sua temperatura média mais baixa, no mês de julho com 13,5°C, enquanto que, o mais quente, ocorre em fevereiro com 21,2 °C, demonstrando uma amplitude, ao longo do ano, de 7,7 °C.

As chuvas apresentam padrão geral semelhante ao comportamento das temperaturas, se mantendo mais volumosas no verão e, conforme a aproximação do inverno, os níveis se reduzem.

Observa-se que as mesmas diminuem durante os meses de março a abril e se mantêm niveladas por baixo até setembro, quando voltam a subir. O mês menos chuvoso é agosto com uma precipitação acumulada média de 75,6 mm, enquanto que janeiro é o mais chuvoso com 218,8 mm.

**FIGURA 20** - Curitiba: Normais Climatológicas 1975 – 2015.



FONTE: INMET (2019).

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) explicam tal dinâmica a partir da presença das Massas Polares que, embora atuem também nas demais estações do ano, são mais intensas no inverno, tornando-se responsável pela queda na temperatura e na precipitação, em função de sua origem na Antártida.

Tal massa é atraída pelas baixas pressões na região Sul do continente americano, e é auxiliada ao entrar no continente por suas calhas naturais e relevo. Em épocas de verão, as temperaturas aumentam, em função da perda de força das massas polares e do avanço das tropicais e ocasionalmente equatoriais.

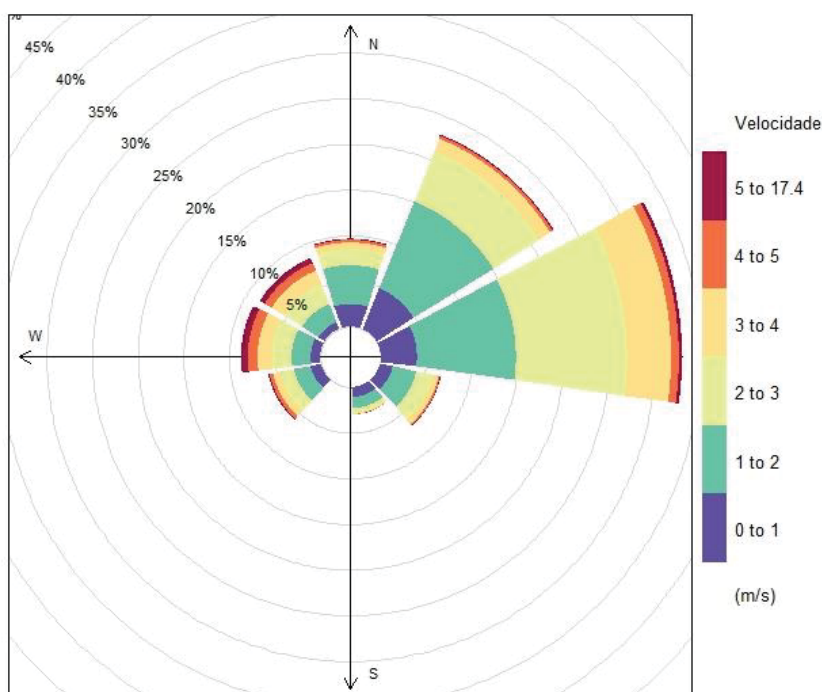
As poucas chuvas entre os meses de maio a agosto, aliado as baixas temperaturas que possibilitam poucas correntes convectivas, tornam este período do ano o mais propício ao acúmulo dos poluentes de forma geral, e, portanto, a época em que a qualidade do ar tende a ser a pior.



Os ventos na região, conforme apontam estudos de Castelhana e Roseghini (2018), possuem maior percentual proveniente de leste. Em seguida observam-se nordeste e norte. Os ventos provindos do quadrante sul são os com menor intensidade na área de estudo. Os autores coletaram dados horários para o período de 2004 a 2015 da estação meteorológica do SIMEPAR, demonstrando além da ampla predominância dos ventos provindos dos quadrantes Leste, uma a velocidades média entre 1m/s e 2 m/s.

A figura 21 destaca tal dinâmica ao longo do ano, e apontam ainda, os setores Oeste e Noroeste como aqueles em que se observam o maior percentual de ventos a velocidades mais altas, acima de 4m/s.

**FIGURA 21** - Curitiba: Ventos Predominantes 2004 – 2015.



FONTE: Castelhana (2018).

Em mesmo estudo realizaram-se análises sazonais da dinâmica dos ventos (Figura 22). Pode-se constatar a predominância dos quadrantes Leste e nordeste em todas as estações do ano.

De março a maio, durante o outono, observa-se quase 30% dos ventos provindos de Leste, seguido por nordeste com 20% e Norte e Oeste com cerca de 10%. Passando para o inverno, de junho a agosto, o quadro se inverte, com maior predominância de ventos a Nordeste com cerca de 28% de



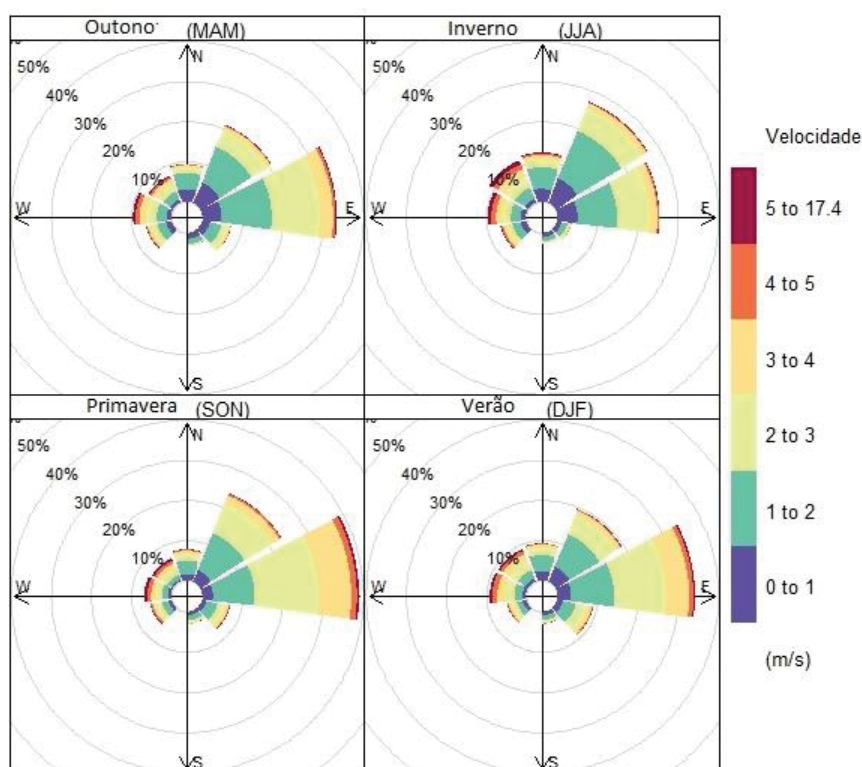
predominância, seguidos por Leste com 25%, e com Norte (11%) e noroeste (10%) na sequência.

Na estação seguinte, Primavera, o quadro volta a se inverter, com ampla predominância de Leste com cerca de 39%, seguido por Nordeste com 22% e Norte com 9%.

No verão a situação é semelhante, 33% de ventos predominantes de Leste, 20% a Nordeste e Norte, Noroeste e Oeste, com cerca de 10% cada.

Em relação a velocidade, observou-se que os períodos de primavera e verão foram aqueles em que os ventos acima de 3m/s tiveram percentuais mais elevados quando comparados aos demais, e novamente, destaca-se os quadrantes Oeste e Noroeste como aqueles com maior percentual de ventos a velocidades acima de 4m/s.

**FIGURA 22** - Curitiba: Ventos por Estação 2004-2015.



FONTE: Castelhana (2018)

Conforme se avança pela região Leste do AUC, a topografia vai se acentuando, uma vez que se aproxima a região da Serra do Mar. Observando tal fato, compreende-se em partes a predominância dos ventos nesta região, dada a diferença de relevo. Além disto, observa-se a presença da calha do Rio Ribeira e do Rio Iguaçu, o primeiro vindo de direção Nordeste e o segundo

serpenteando a parte Leste da cidade vindo da serra, sendo estas as contribuições indiretas do relevo para a dinâmica da qualidade do ar no AUC.

Os autores ressaltam ainda a relação com os tipos de atuante e a posição dos centros de alta e baixa pressão na costa paranaense como corresponsáveis por dita dinâmica.

A predominância dos ventos nos sentidos Leste e nordeste aponta para a formação de uma pluma de dispersão para as regiões Oeste e Sudoeste da capital, mesma região onde se constatou o aumento da mancha urbana, aglutinação de indústrias e retirada da cobertura vegetal.

No período de inverno, meteorologicamente mais propício ao acúmulo de poluentes, acrescenta-se o fato da velocidade média dos ventos apresentarem-se como a mais baixa dentre as estações do ano, o que potencializa ainda mais a capacidade de acúmulo de poluentes neste período.

Partindo para os *inputs* condicionantes de ordem social, enfatiza-se o processo de verticalização da cidade, já foi abordado anteriormente à verticalização predominante nos chamados eixos estruturais da cidade, em decorrência de sua lei de zoneamento. A possibilidade de construir torres com grandes alturas, aliado a permissibilidade de construções muito próximas, tornou trechos destes eixos, sobretudo os mais próximos às regiões centrais, com características típicas de *canyons* urbanos.

**FIGURA 23** – Curitiba – Verticalização dos Eixos Estruturais e a formação de Canyons Urbanos.



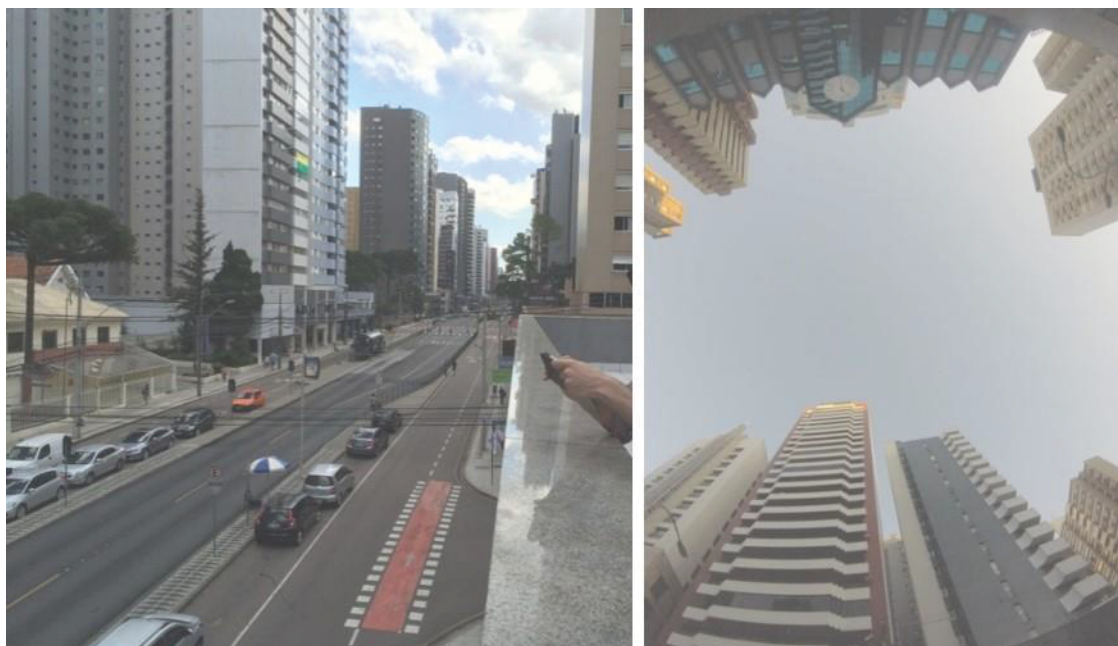
FONTE: IPPUC (2016).

Danni-Oliveira (2000) atestou tal fato, ressaltando a influência das feições urbanas a nível local na dispersão de poluentes, tais como grandes construções alocadas muito próximas umas das outras e em ambas as faces de uma quadra. Seus estudos apontaram os trechos dos eixos urbanos próximos a região central como *hotspots* de poluentes em função de tais características de morfologia urbana, aliada as fontes emissoras presentes.

Mesmo fato foi comprovado através de modelos digitais propostos por Bender e Dziedzic (2014). Os autores analisaram o eixo estrutural referente à Avenida Sete de Setembro na região central da cidade de Curitiba (Figura 24). Suas conclusões apontaram que a largura da via, aliado à altura dos edifícios promovem um maior acúmulo de NO<sub>x</sub> a depender da direção de ventos, o que tem como consequência um maior potencial de altos níveis de ozônio nestes sítios.

Os autores realçaram a divergente dinâmica dos ventos entre estes pontos específicos e os dados coletados por estações meteorológicas oficiais.

**FIGURA 24-** Avenida Sete de Setembro. Exemplo de *canyon* urbano.



FONTE: Acervo do autor (2016).

As formas urbanas presentes no centro de Curitiba, também presentes em diversas cidades de médio a grande do Brasil, reiteram o papel do planejamento e produção do espaço urbano nas más condições de qualidade do ar e indicam regiões em potencial no centro adensado da cidade em que podem-se encontrar *hotspots* de poluentes atmosféricos.

### I.3 ATRIBUTOS DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA”

Ademais dos fatores determinantes e condicionantes os atributos do Sistema Poluição Atmosférica, são tidos como os elementos específicos de cada sociedade ligados ao que Mendonça (2004b) denomina superestruturas da sociedade, estando mais relacionadas a questões políticas, econômicas e culturais do espaço em análise. Neste subcapítulo, serão evidenciados os elementos considerados atributos dentro do Sistema Poluição Atmosférica.

A quantidade de veículos, já mencionado, como um grande responsável pela poluição, está intimamente ligado aos atributos culturais e educacionais. O fato do carro, nas sociedades ocidentais ser visto como *status*, justifica em partes, o grande número de veículos circulando nas cidades, e evidencia esta relação com a cultura, modo de vida e educação dos cidadãos.



Transportes alternativos e menos agressivos em relação à emissão de poluentes, tais como: bicicletas, transportes públicos ou mesmo caminhadas, são deixados de lado em função deste *status* (STEG, 2005). Steg salienta que, mudanças neste paradigma, perpassam pela aquisição de novos hábitos, mas, sobretudo por processos educacionais que impulsionem a quebra destas ideias vigentes.

A circulação de veículos privados, possui ainda, uma íntima relação com a situação econômica do país. Ximenes et. al., (2008) evidencia o intenso crescimento da frota de veículos automotores no Brasil, com recordes de produção e venda nos anos 2007 e 2008 como consequência do bom andamento da economia brasileira, da facilidade de crédito e do crescimento da renda média do brasileiro.

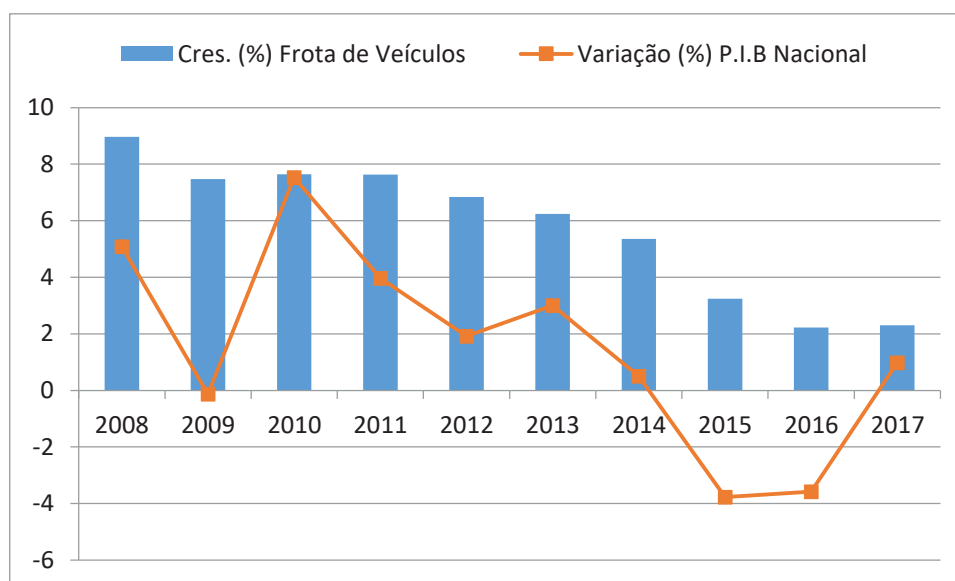
O carro, conforme salientado, enquanto objeto de *status*, tornou-se um item de muita procura neste período de prosperidade econômica. Os autores apontam ainda, alguns períodos dos anos 1980 e metade da década de 1990, em que as vendas de veículos, em âmbito nacional, apresentaram quedas, em consequência de períodos de economia desaquecida.

É ressaltada, pelos mesmos autores, a relação entre crescimento econômico e o aumento nas emissões de poluentes, instigando estudos a estabelecerem em maior nível de detalhe tais relações e propondo a economia um papel importante no entendimento de problemas de ordem ambiental.

O gráfico da figura 25 evidencia a relação entre a variação no crescimento da frota de veículos no estado do Paraná e a situação econômica do país, evidenciada pela variação do Produto Interno Bruto (P.I.B) nacional, relação apontada por Ximenes et. al., (2008).

Por mais que a frota de veículos no Estado siga crescendo, sua taxa de crescimento acompanha a variação do P.I.B, indicando novamente a relação indireta entre qualidade do ar, política e economia.

**FIGURA 25** – Crescimento da Frota de Veículos no Paraná (2008-2017) e Variação do P.I.B. Nacional (2008 – 2017).



FONTE: DENATRAM (2019) e Banco Mundial (2019).

Outra fonte de poluição que tem estreita relação com o modo de vida e também com a cultura, economia e tecnologias, provém da queima de lenha. Branco e Murgel (2004) apontam que, lareiras, fornos a lenha, fogões a lenha e outras atividades relacionadas à queima de madeira ou outros materiais possuem alto percentual de material particulado e partículas inaláveis.

Em pesquisa realizada no município de Saporanga no ano de 2014, identificou a queima de lenha para fins domésticos como o grande emissor de poluição de tal município. Tal fato se deve ao costume da população local de cozinhar com fogão a lenha, prática comum no município (GIDHAGEN et. al., 2015).

O resultado foi semelhante ao encontrado por Monteiro (1989) em estudo já citado sobre a cidade do Porto e por Czernecki et. al., (2017) na Polônia em que, além da queima de lenha para fins domésticos, os sistemas a caldeira e carvão de aquecimento residencial nas épocas mais frias também são apontados como potencial causa de aumento nos níveis de material particulado em suspensão.

Problema semelhante foi observado em São Paulo por Kumar et. al., (2016). Os autores identificaram que emissões de fontes consideradas pequenas, principalmente as provenientes de pizzarias, churrascarias, padarias e restaurantes que utilizam fornos a lenha, respondem por uma parcela

significativa da poluição na cidade, dado o alto número de estabelecimentos com tais características. Contudo, a falta de regulação para tais fontes torna os dados a este respeito desconhecidos.

Os autores citam que, o fato de as emissões nestes pontos serem provenientes de chaminés de pouca altura, faz com que os efeitos diretos desta poluição sobre a população sejam inclusive, maiores do que aqueles provenientes das emissões industriais, uma vez que, as chaminés industriais se encontram em alturas mais elevadas.

#### I.4 APLICAÇÕES DO “SISTEMA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA”

Este subcapítulo abordará as aplicações do “Sistema Poluição Atmosféricas” observadas atualmente, dando ênfase especial as legislações, aos processos que levaram a suas criações e a incidentes famosos que possibilitaram algumas discussões envolvendo a temática da qualidade do ar no âmbito das políticas públicas.

A preocupação com o meio ambiente e as políticas públicas atuais são provenientes de processos iniciados no século XIX, quando surgem os primeiros movimentos ambientalistas e com a criação do primeiro Parque Nacional do mundo, o Parque Nacional Yellowstone nos E.U.A. Fruto em partes, da sensibilização da sociedade civil organizada frente a quase extinção de áreas naturais e animais nativos no Oeste americano (SIMONS, 1988; VALLEDOR DE LOZOYA, 2004).

Já no início do século XX, novas questões ambientais passam a ser discutidas. Impulsionadas por eventos impactantes como o ocorrido no Vale do Meuse na Bélgica nos anos 1930, a poluição atmosférica entra na pauta ambientalista. O fato se sucedeu devido a uma combinação de altas emissões e condições climáticas, e causou sessenta mortes em apenas cinco dias (DERISIO, 2012).

Os anos 1940 nos E.U.A marcam um período fortemente pautado no desenvolvimentismo do país que, a mais de uma década, já é em sua maioria urbano (conforme já visto, o Brasil atingira este patamar apenas nos anos 1970 (SANTOS, 1993).



Assim, vê-se crescer o número de construções de infraestrutura por parte do poder público como rodovias, portos, aeroportos, represas, usinas e etc., consequências diretas da aplicação de políticas econômicas keynesianas e afetando diretamente o meio ambiente local (RIERA, 2000).

Neste período, ocorre outro caso ligado a questão da qualidade do ar e que ganhou notoriedade. Na cidade de Donora, estado da Pensilvânia, região nordeste dos E.U.A em 1949, uma intensa nuvem de material particulado e dióxido de enxofre emitido por indústrias siderúrgicas, teve como consequência vinte mortes e sensibilização da mídia Norte-americana (FLETCHER, 1949). O caso é tão famoso que hoje em dia, é possível visitar um museu na cidade que o relata com maiores detalhes. O evento ficou conhecido como *Donora Smog*.

A consequência deste acontecimento foi, já nos anos 1950, a aprovação da *Air Pollution Act of 1955* nos Estados Unidos, a primeira lei federal envolvendo poluição atmosférica e um marco para a legislação ambiental. Este ato proveu fundos para pesquisa nesta área, ocasionando no *Clean Air Act of 1963* que estabeleceu, no controle de saúde pública Norte-americana, um sistema federal de monitoramento da poluição atmosférica.

Contudo, somente em 1969 que de fato, a primeira iniciativa legal passa a colocar o meio ambiente como um fator para política de desenvolvimento econômico. Tal fato se sucedeu novamente nos E.U.A, com a criação da *National Environmental Policy Act* (NEPA).

Nesta época, observou-se um crescimento da preocupação com aspectos do Clima e da Qualidade do ar. Em 1975, Wallace Broecker traz pela primeira vez a ideia de aquecimento global com seu artigo intitulado "*Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?* ", apontando a influência das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera para o clima do planeta.

Para situar tal preocupação, a revista Norte-americana Life, de janeiro de 1970, traz em uma de suas notícias, uma série de previsões apocalípticas para a sociedade Norte-americana, caso a mesma mantivesse os níveis de emissão de poluentes atmosféricos praticados.

Segundo a revista, nesta época as pessoas teriam de equipar-se com máscaras protetoras para poderem sair às ruas. Hoje se sabe que tais previsões não se concretizaram, contudo servem como exemplo da preocupação que a sociedade desta época tinha com tal problema.

Em 1971 foram elaborados e aprovados nos E.U.A os primeiros parâmetros legais para medição e fiscalização de poluentes atmosféricos. Desde então, ditos parâmetros vêm sendo revisados e alterados conforme necessidade e avanços tecnológicos chegando até 2015, ano em que a última revisão foi lançada.

Nesta primeira legislação, foram estabelecidos parâmetros para Ozônio (O<sub>3</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>), Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>) e Partículas Totais em Suspensão (PTS).

Com o passar dos anos, novos parâmetros foram criados, assim como novos poluentes inseridos. O PTS, por exemplo, não consta mais na legislação Norte-americana atual, dando espaço para o PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub>, referentes a material particulado com espessuras inferiores ao PTS (100 µm) e, portanto, mais danosas à saúde. A tabela 3 aponta a legislação Norte-americana corrente.

As primeiras legislações correspondentes ao monitoramento de poluição do ar na Europa foram em períodos semelhantes as vistas nos E.U.A e seguiram dinâmicas igualmente próximas, tendo surgido como respostas a episódios problemáticos envolvendo a má qualidade do ar.

Além do evento no Vale do Meuse já citado, um dos episódios mais emblemáticos foi o grande *smog* londrino em 1952, já mencionado na introdução desta tese.

Este evento, ocorrido na capital inglesa deflagrou o início das discussões legais concernindo o controle, monitoramento e fiscalização da qualidade do ar no país, culminando no *Clean Air Act de 1956*, primeira legislação a respeito deste tema no continente europeu.

A legislação, embora ainda não estipulasse parâmetros mínimos legais para os níveis de qualidade do ar, estabeleceu entre outros pontos, alturas mínimas para chaminés industriais, áreas livres de fumaça e adaptações para lareiras e sistemas de aquecimento privados.

**TABELA 3-** Parâmetros Mínimos de Concentração de Poluentes Aceitáveis segundo a Legislação Norte-americana atual.

POLUENTE		PADRÃO	ESCALA TEMPORAL	NÍVEL	OBSERVAÇÕES
Monóxido de Carbono (CO)		Primário	8 horas	9 ppm	Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano
			1 hora	35 ppm	
Chumbo (Pb)		Primários e Secundários	Média móvel de 3 meses	0.15 µg/m <sup>3</sup>	
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )		Primário	1 hora	100 ppb	Média anual
		Primário e Secundário	1 ano	53 ppb	
Ozônio (O <sub>3</sub> )		Primário e Secundário	8 horas	70 ppb	
Material Particulado (MP)	PM <sub>2.5</sub>	Primário	1 ano	12.0 µg/m <sup>3</sup>	Média anual em três anos
		Secundário	1 ano	15.0 µg/m <sup>3</sup>	Média anual em três anos
		Primário e Secundário	24 horas	35 µg/m <sup>3</sup>	
	PM <sub>10</sub>	Primário e Secundário	24 horas	150 µg/m <sup>3</sup>	Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )		Primário	1 hora	75 ppb	Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano
		Secundário	3 horas	0.5 ppm	

FONTE: NAAQS. Org.: Castelhana (2019).

No âmbito de Europa enquanto comunidade, os primeiros parâmetros que contemplem todo o bloco econômico foram promulgados enquanto norma diretiva do Conselho da Comunidade Europeia em 1980. A diretiva 80-779 deste ano, aborda entre outros pontos, os limites mínimos de concentração para SO<sub>2</sub> e PTS, que deveriam ser seguidos pelos países membros deste bloco.

Desde então, as diretivas europeias passam a serem sistematicamente atualizadas. Até a Diretiva 2008/50, última atualização, traz consigo uma novidade, apresentando os conceitos de valor-limite e valor-alvo.

O primeiro conceito é de atendimento obrigatório a partir da data, enquanto que, os valores-alvo tem um caráter de meta a ser atendida pelos países membros (SANTANA et. al., 2012).

A tabela 4 apresenta os parâmetros de valores-limite de qualidade do ar estipulados nesta última diretiva europeia e vigente até o momento.

**TABELA 4** - Parâmetros Mínimos de Concentração de Poluentes Aceitáveis segundo a Legislação Europeia atual.

POLUENTE		ESCALA TEMPORAL	NÍVEL
Chumbo		1 ano	0,5 µg/m³
Benzeno		1 ano	5 µg/m³
Monóxido de Carbono (CO)		8 horas	10 µg/m³
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)		1 hora	200 µg/m³
		1 ano	40 µg/m³
Ozônio (O₃)		8 horas	100 µg/m³
Material Particulado (MP)	PM₂,₅	1 ano	25 µg/m³
	PM₁₀	24 horas	50 µg/m³
		1 ano	40 µg/m³
Dióxido de Enxofre (SO₂)		1 hora	350 µg/m³
		24 horas	125 µg/m³

FONTE: Diretiva 2008/50/CE.

No Brasil, o primeiro caso de grande repercussão ligado à poluição do ar se deu em Bauru em 1952, quando nove pessoas faleceram e cerca de 150 foram acometidas de doenças respiratórias graves, como consequência de uma grande quantidade de pó de sementes emitidas à atmosfera por uma indústria local (DERISIO, 2012).

Contudo, é a região de Cubatão, Estado de São Paulo, o local onde ocorreu o evento de maior repercussão nacional. A cidade nos anos 1980 e início dos 1990 apresentava níveis altíssimos de poluentes, causando uma série de danos à saúde da população local. Desde esta época, com mais evidência, destaca-se a importância de se manter uma rede de monitoramento da qualidade do ar no país, mas principalmente em grandes polos industriais

como é o caso de Cubatão no Estado de São Paulo, tendo em vista que as consequências de uma má qualidade do ar são inúmeras.

Em um período um pouco anterior ao evento de Cubatão, em 1975, o decreto 1.413 foi a primeira lei do país a dispor sobre o controle da poluição ambiental provocada por atividades industriais. Tal lei foi suplementada pela Portaria Minter 231 de 1976 que estabeleceu os primeiros parâmetros legais para qualidade do ar no Brasil, embasados pela legislação Norte-americana e complementado pela lei 6.803 de 1980 que dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial em função de consequências ligadas a poluição industrial. Ainda na década de 1980, a lei 6.938/1981 estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente e define Poluição como:

[...]a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (Lei 6.928, 1981, art.3º, inciso III).

As leis 6.803/1980 e 6.938/1981 foram consequência de uma sensibilização nacional frente a este problema, muito devido aos constantes problemas em Cubatão, chamado pela mídia a época de “Vale da morte”.

Apesar de não definirem padrões legais para o controle da qualidade do ar, estas leis foram de fundamental importância para a criação da Resolução 003/1990 do CONAMA (Tabela 5), a atual lei brasileira e que estabeleceu os parâmetros legais para os níveis de poluição atmosférica (PEREIRA JR., 2007).

Em comparação a legislação vigente nos E.U.A, e na Europa observa-se que as principais mudanças estão na ausência de parâmetros para o PM<sub>2.5</sub>, Chumbo e Benzeno. Nossa legislação ainda conta com parâmetros para o PTS, o material particulado mais grosseiro, parâmetros estes já inexistentes na legislação Norte-americana.

Os padrões de qualidade do ar no Brasil, vigentes desde o ano 1990 jamais sofreram atualizações, portanto encontram-se deveras desatualizado em relação às orientações da Organização Mundial de Saúde (OMS) e a

demais sistemas como o dos E.U.A e da União Europeia. (SANTANA ET. AL, 2012).

**TABELA 5-** Parâmetros Mínimos de Concentração de Poluentes Aceitáveis segundo Legislação brasileira vigente

POLUENTE		PADRÃO	ESCALA TEMPORAL	NÍVEL
Monóxido de Carbono (CO)		Primário e Secundário	8 horas	9 ppm
			1 hora	35 ppm
Fumaça		Primários	24 horas	150 µg/m <sup>3</sup>
		Secundários		100 µg/m <sup>3</sup>
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )		Primário	1 hora	100 ppb
		Secundário	1 hora	190 ppb
Ozônio (O <sub>3</sub> )		Primário e Secundário	1 hora	80 ppb
Material particulado (MP)	PTS	Primário	24 horas	240 µg/m <sup>3</sup>
		Secundário	24 horas	150 µg/m <sup>3</sup>
	PM <sub>10</sub>	Primário e Secundário	24 horas	150 µg/m <sup>3</sup>
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )		Primário	1 hora	75 ppb
		Secundário	1 hora	100 ppb

FONTE: CONAMA. Org.: Castelhana (2019).

Martins et. al., (2001) apontam ainda, que além das legislações e parametrizações, o governo brasileiro, em suas distintas esferas, tem, nos últimos quarenta anos, proposto algumas medidas legais para evitar ou diminuir as emissões de poluentes.

Já se mencionou os programas de redução das emissões veiculares, apontados por Saldiva (2012) como programas de grande eficácia e que vem mostrando resultados positivos quando da redução dos níveis de SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> já observados.

Martins et. al., (2001) ressaltam também o papel do rodízio de carros promovido na cidade de São Paulo como uma política que auxiliou a redução do volume de poluentes atmosféricos na capital paulista e que, portanto, poderia ser replicada em outros grandes centros urbanos brasileiros.



Procurou-se, neste capítulo inicial, estabelecer uma metodologia sistêmica que contemplasse os elementos influentes e desencadeadores da qualidade do ar e pavimentasse um caminho para a realização da presente pesquisa. Além da explanação acerca dos elementos da metodologia proposta, procurou-se salientar como tais elementos atuam sobre o Aglomerado Urbano de Curitiba.

No capítulo a seguir, inicia-se a fase de análise do problema na área de estudo, visando comprovar a eficácia do sistema proposto. Serão analisadas a dispersão e mapeamento de poluentes pela área de estudo, bem como sua relação com uso do solo, morfologia e funções urbanas. O papel dos *inputs* determinantes à poluição atmosférica, bem como, dos condicionantes não condizentes ao clima, seguindo a lógica proposta neste primeiro capítulo.

## **CAPÍTULO II – INTERFACES ENTRE O URBANO E A QUALIDADE DO AR NO AUC – AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA.**

A poluição atmosférica, em sua dimensão geográfica, apresenta intrínseca relação com fatores espaciais como o uso do solo, morfologia urbana, e funções urbanas, de modo que, este capítulo tem como foco central a análise e detalhamento da relação entre os níveis de poluente e estes fatores no Aglomerado Urbano de Curitiba.

Para a realização desta etapa da pesquisa, pressupõe-se a necessidade de espacialização da poluição do ar no Aglomerado Urbano de Curitiba.

Estabelecer relações entre elementos espaciais e os níveis de qualidade do ar, contudo, mostra-se como uma tarefa muito mais complexa do que aparenta. Os níveis de poluição em um dado local apresentam uma ampla gama de variáveis, o que os torna um fenômeno de rara dificuldade em se mapear a certo nível de detalhe, pelo fato que os registros de um poluente podem facilmente se alterar em intervalos espaciais relativamente curtos, a depender de uso do solo, tráfego de veículos, vegetação, microclima, tamanho de edifícios, entre outros fatores, apresentados no “Sistema Poluição do Ar”.

Para Briggs et. al., (1997), a utilização de Sistemas de Informação Geográfica encontra, nesta diversidade de elementos, a sua grande limitação. Para os autores, os SIG's são uma boa forma de observar a espacialização da poluição atmosférica, contudo, apenas para uma escala com menor nível de detalhe, em decorrência da facilidade com que tais fenômenos podem ter alterações em seus valores, e em curtos espaços.

Procurando mapear pontos mais poluídos, Sulaiman et. al., (2017) utilizaram técnicas de interpolação *topo to raster* com dados provindos de quatro estações dispersas em uma área de 44 mil hectares no vale do Rio Klang, na Malásia. O resultado só pode ser utilizado a partir de uma análise generalizada, e ainda assim, passível de críticas dado que, a dispersão dos poluentes obedece a outras regras não contempladas por este modelo, como dinâmica dos ventos, feições urbanas entre outras.

Briggs et. al., (1997) suportam que, a ideia de que uma análise mais detalhada e que possibilite o estabelecimento de conexões deva ser realizada através de modelos de dispersão ou dados pontuais.

Segundo os autores, as utilizações de modelos matemáticos de dispersão permitem uma aproximação mais real para a distribuição do poluente dado que, as condições meteorológicas (principalmente estabilidade e dinâmica dos ventos) serão levadas em conta em sua concepção, contudo, sua escala de análise ainda apresenta lacunas por não possibilitar um melhor detalhamento e não levar em conta as rugosidades criadas pelo tecido urbano.

Moreira e Tirabassi (2004) ressaltam as redes de monitoramento de qualidade do ar como a forma mais eficaz de realizar a gestão ambiental de territórios neste âmbito, contudo, os autores salientam que, a utilização de modelos pode ser uma ferramenta eficaz para se estudar cenários sem monitoramento, apontando o alcance espacial dos modelos como sua principal vantagem.

Assim, pensando em promover uma melhor aproximação entre a dispersão da poluição atmosférica e o aglomerado urbano de Curitiba, este capítulo será subdividido em duas partes, a primeira delas, visará uma análise geral da dinâmica da poluição para o AUC embasado por dados das estações de monitoramento e modelos de dispersão atmosférica.

Esta primeira etapa apresenta a relação entre o sítio urbano de Curitiba e os níveis de poluição do ar em escala meso, segundo a teoria de Oke (2004)

A segunda trará dados oriundos de coletas em campo em pontos específicos da cidade com a finalidade de se aproximar a escala de análise deste fenômeno, propondo uma análise a nível local, ainda conforme Oke (2004).

Ambas etapas são complementares e proporcionarão uma visão mais íntegra da variação espacial dos poluentes pela área de estudo, visando preencher o objetivo específico II desta pesquisa.

## II.1 QUALIDADE DO AR EM ESCALA MESO NO AUC

A primeira abordagem realizada em meso escala foi feita a partir de dados secundários coletados pela rede de estações oficiais de monitoramento da qualidade do ar do IAP.

Analizando dados oficiais do IAP sobre as estações de monitoramento da qualidade do ar, pode-se estabelecer uma primeira aproximação entre o urbano e a qualidade do ar no AUC.

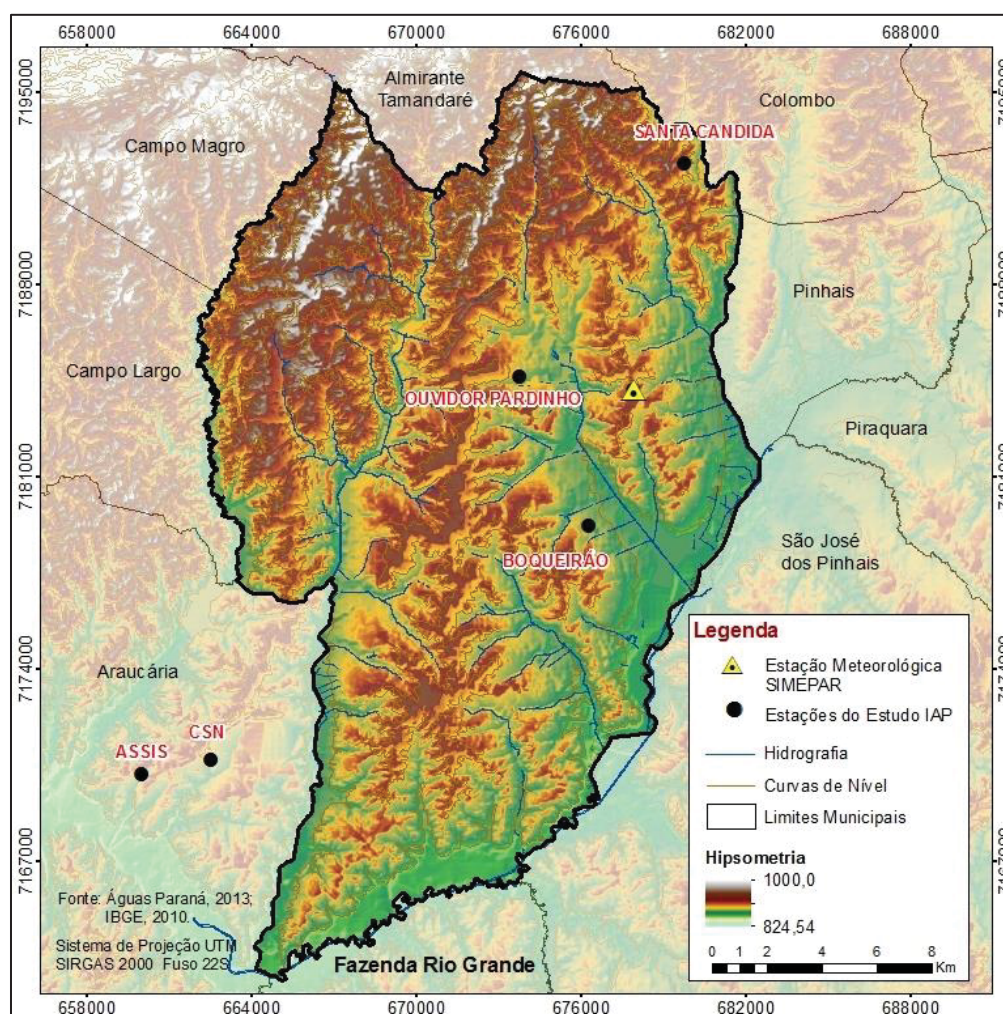
As figuras a seguir sintetizam os valores médios para os poluentes trabalhados nesta tese ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , PTS e  $\text{O}_3$ ), durante o período 2005-2014, totalizando dez anos de dados e os relacionam com a paisagem urbana a qual representam, formando um perfil dos níveis de poluição na região de Curitiba.

A escolha dos poluentes se justifica por levantamento realizado por Castelhana et. al., (2014) conforme mencionado anteriormente, em que os mesmos foram apontados como os mais problemáticos no A.U.C, isto por apresentarem os níveis médios mais altos.

O perfil esquemático a ser apresentado se inicia na região da estação Assis, no extremo Sudoeste do AUC, próximo ao limiar da zona rural, passando pela região industrial onde se localiza a estação CSN e rumando por áreas urbanas residenciais até a região central da capital local em que se encontra a estação Praça Ouvidor Pardinho. O trajeto segue por áreas urbanas residenciais características como o entorno da região Boqueirão, e se finaliza na estação Santa Cândida, no extremo nordeste de Curitiba, área considerada com um subúrbio residencial (Figura 26). A título de ilustração inseriu-se nos diagramas a direção predominante dos ventos conforme estudos de Castelhana e Roseghini (2018).

A rede oficial do IAP contava ainda com estações em Colombo, município na região Norte de Curitiba, e a Praça Rui Barbosa, todavia ambas eram manuais e foram desativadas em 2014. Existem ainda outras duas estações no município de Araucária, REPAR e UEG, ambas no distrito industrial.

A estação REPAR foi deslocada recentemente, alterando significativamente os valores que a mesma registrava, comprometendo assim os estudos acerca de sua série histórica. A estação UEG por outro lado, situa-se muito perto da estação CSN, dando-se preferência à segunda por apresentar menos falhas em sua série.

**FIGURA 26- AUC/Parcial - Localização das Estações Utilizadas neste Estudo**

FONTE: Águas Paraná (2013); IBGE (2010). Org.: Castelhana (2019)

A escolha das estações se deu por critérios de disponibilidade e qualidade dos dados, sendo estas, dentre todos os pontos da rede oficial, os com melhor sequência de registros para os poluentes escolhidos nesta parte do estudo.

Adotou-se para as análises, a serem apresentadas neste trabalho, as unidades PPB para os poluentes  $O_3$ ,  $SO_2$  e  $NO_2$  e  $\mu g/m^3$  para PTS.

Cada uma das estações representa uma realidade urbana distinta com usos do solo, funções e feições urbanas igualmente diferentes.

A estação Santa Cândida se localiza na região Norte da cidade de Curitiba, próximo à divisa com o município de Colombo e se configura como um típico bairro residencial suburbano da capital. A grande porção Norte do bairro, incluso onde está inserida a estação de monitoramento, está dentro da denominada da Zona Residencial 2, o que indica como características de uso



de solo majoritário voltado para baixa e média intensidade de construções habitacionais (Figura 27).

**FIGURA 27-** Curitiba / Colombo: Área urbana limítrofe e localização da Estação Santa Cândida.



FONTE: Google Earth; Acervo do Autor (2016). Org.: Castelhana (2019)

A área conta com parcelas significativas de áreas verdes em seu entorno provenientes do complexo do Banestado a Oeste, o parque do Bacacheri a Sudoeste e o parque do Atuba a Leste, dentre outras áreas particulares e praças.

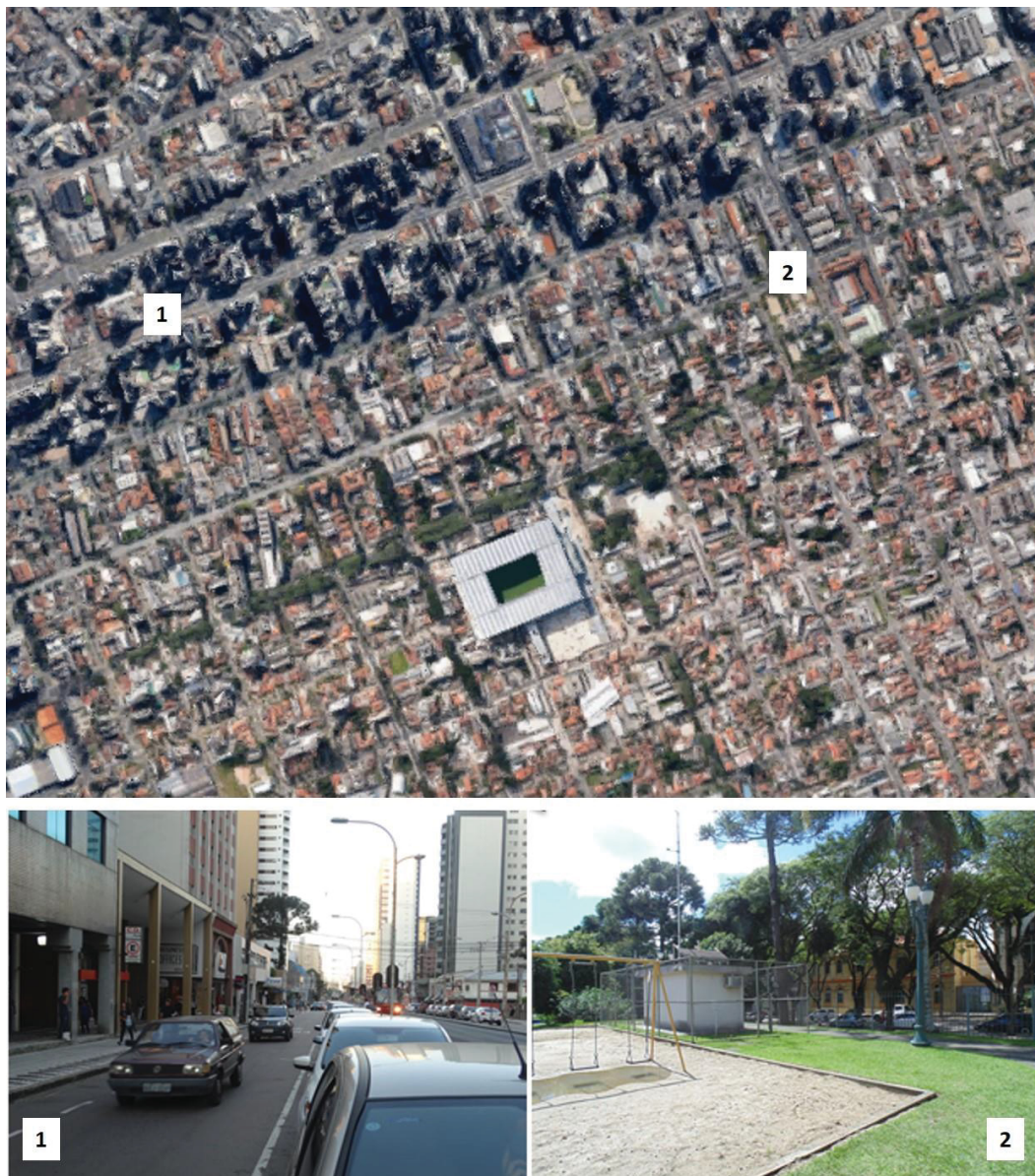
Na imagem observa-se a presença do terminal de ônibus do Santa Cândida ao Sul, cercado por vias de grande movimentação, que formam o eixo estrutural que liga a porção Norte da cidade ao centro, formado pelas Avenida Paraná, Rua São João e Rua João Gbur.

A estação localizada junto a Praça Ouvidor Pardini é, dentre as analisadas, a que se encontra na paisagem mais caracteristicamente



urbana/densa. O ponto se localiza no centro da capital, e conforme se pode observar na Figura 28 o uso do solo em seu entorno é caracterizado como predominantemente urbano denso e verticalizado, com poucas e restritas áreas verdes oriundas de pequenas praças.

**FIGURA 28**– Curitiba: Área urbana central e localização da Estação Praça Ouvidor Pardinho.



FONTE: Google Earth; Acervo do Autor (2016). Org.: Castelhana (2019)

Cabe ressaltar o grande fluxo de veículos da região em função de sua centralidade e alto grau de densidade populacional. O fluxo de veículos pesados, como o dos ônibus, também é constante, tendo em vista a quantidade de pessoas que se deslocam de seus bairros ou cidades vizinhas rumo ao centro. O local encontra-se próximos as avenidas Silva Jardim e Sete



de Setembro que formam a via estrutural Sul e compreendem um dos corredores de maior circulação de transporte público da capital.

O ponto de coleta do Boqueirão representa um local com uso do solo predominantemente residencial de média densidade, próxima a indústrias de pequeno porte e pouco verticalizado. O bairro se localiza na região Leste de Curitiba, junto à divisa com São José dos Pinhais.

A figura 29 permite visualizar as poucas áreas verdes no bairro, assim como a presença de terminais de ônibus junto a Avenida Marechal Floriano Peixoto, um dos eixos estruturais que liga o centro de Curitiba a região do Boqueirão e ao município vizinho e também uma estrutural.

**FIGURA 29-** Curitiba: Área urbana periférica e localização da Estação Boqueirão.



FONTE: Google Earth; Acervo do Autor (2016). Org.: Castelhana (2019)

A região em que a estação de monitoramento CSN está inserida é amplamente dominada por complexos industriais de grande porte. Em específico, a própria está inserida dentro de um destes complexos, o da Companhia Siderúrgica Nacional, em Araucária (Figura 30).

**FIGURA 30** – Araucária: Área industrial e Estação CSN



FONTE: Google Earth; Acervo do Autor (2016). Org.: Castelhana (2019)

Também próximo, encontra-se o complexo da REPAR, a quinta maior refinaria de petróleo do país, tendo uma capacidade de processamento de 33 mil m<sup>3</sup> de petróleo por dia, sendo responsável por aproximados 12% da produção nacional de derivados de petróleo e ocupando uma área total de 10 milhões de metros quadrados.



O local é cortado pela Rodovia do Xisto, uma via penetradora que conecta o Oeste e Sul paranaense a região metropolitana de Curitiba, configurando-se como uma via com alto tráfego de veículos pesados.

A última estação escolhida, Assis, se localiza no bairro Fazenda Velha em Araucária, e se caracteriza como um local majoritariamente suburbano de baixa densidade e próximo a áreas rurais (Figura 31). É possível identificar na porção Noroeste uma pequena área industrial. Áreas de vegetação aberta e baixa também são vastas, assim como uma grande mancha de vegetação mais alta na parte Sudoeste.

**FIGURA 31-** Araucária: Área urbana periférica e Estação Assis.



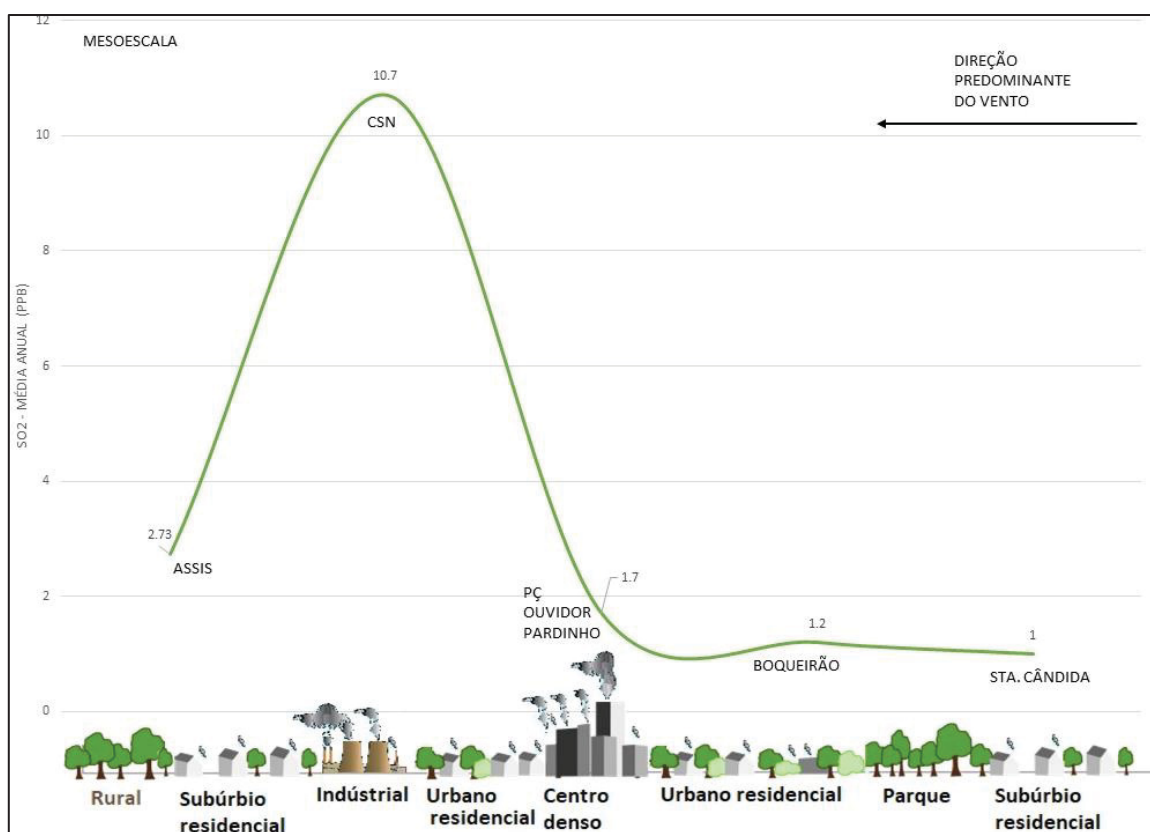
FONTE: Google Earth; Acervo do Autor (2016). Org.: Castelhana (2019)

As vias, em sua maioria, são classificadas pelo próprio município como vias locais, portanto de baixo tráfego. Á sudeste observa-se um pequeno trecho da Rodovia do Xisto (PR-476).

Constata-se ainda, uma via coletora, a Rua Maria Prosdócimo Franceschi, que liga um bairro a outro, apresentando fluxo de baixo a médio de veículos.

Após esta análise preliminar, os dados das estações revelam que alguns dos poluentes apresentaram maior intensidade sob atuação das fontes fixas. O  $\text{SO}_2$  foi um destes casos. Fica claro na figura 32 o papel do aglomerado industrial representado pela estação CSN não apenas em seus altos níveis como também nos da estação Assis.

**FIGURA 32 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por  $\text{SO}_2$**

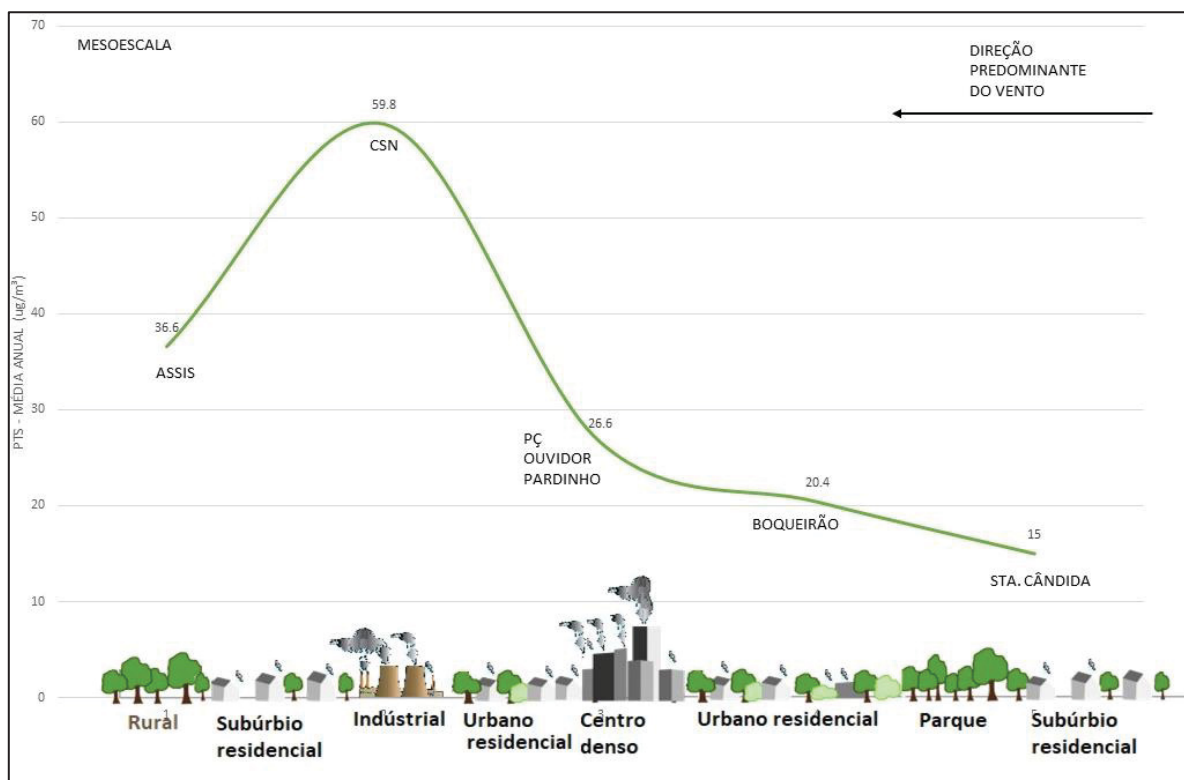


FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019)

Apesar de não ser uma região propriamente industrial, mas sim majoritariamente, residencial de baixa densidade, a região de Assis sofre as consequências de sua proximidade com as indústrias apresentando índices de  $\text{SO}_2$  superiores ao do centro de Curitiba, condicionado, a princípio, pelo regime de ventos da região.

No caso do PTS o efeito das indústrias permanece intenso, mas já se vê a protuberância do gráfico na região da CSN um pouco reduzida em função de valores mais próximos aos registrados na região central de Curitiba, e também no bairro Assis. Os valores para o bairro Santa Cândida aqui presentes foram estimados com base nas médias de PM10 e na relação deste poluente com o PTS.

**FIGURA 33 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por PTS.**



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019)

O efeito do adensamento central de Curitiba passa a ser mais observado no âmbito do dióxido de nitrogênio (Figura 34). Aqui, apesar de ainda observar-se o efeito das indústrias sobre a qualidade do ar, percebe-se que os níveis de poluição no centro já se aproximam das regiões industriais, atestando o efeito dos veículos nos níveis de qualidade do ar.

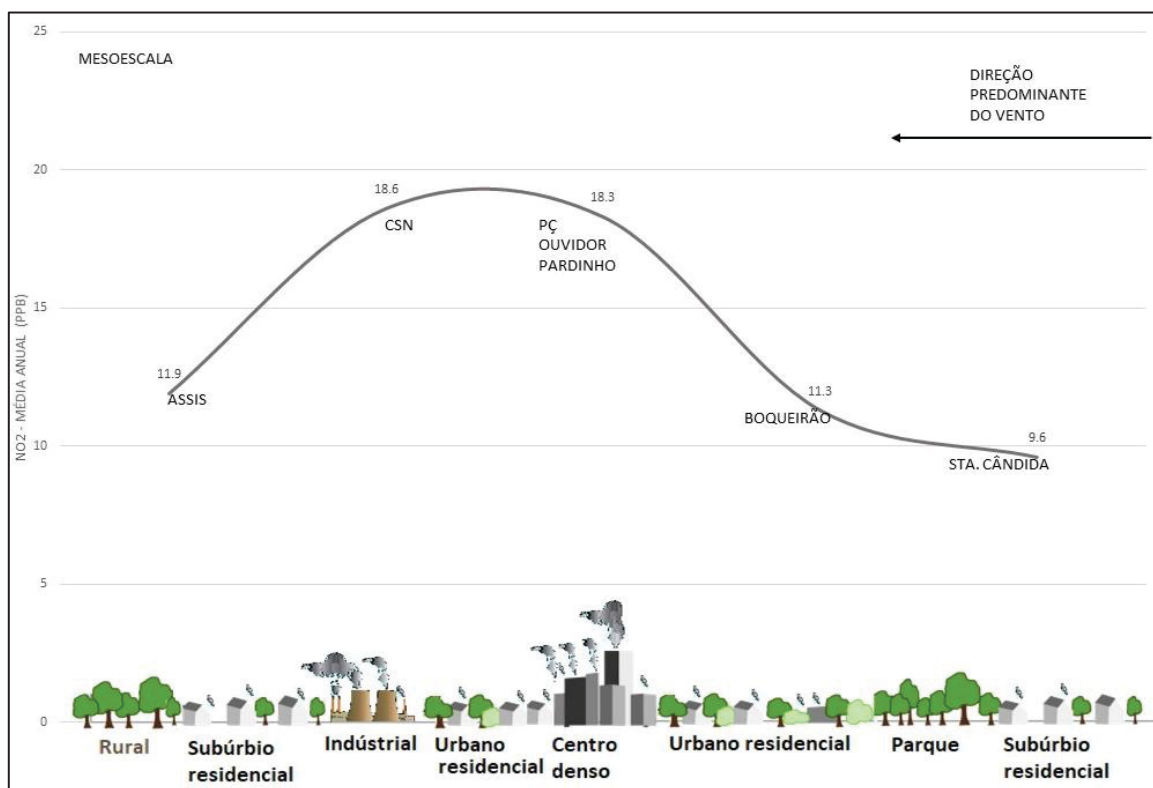
As regiões urbanas residenciais e suburbanas apresentaram níveis de NO<sub>2</sub> gradativamente menores, seguindo a lógica da metodologia proposta.

O único poluente que fugiu do panorama descrito nos demais foi o ozônio troposférico. Neste caso, a região industrial apresentou os valores médios mais baixos enquanto que a região suburbana residencial do Santa Cândida se mostrou como a com pior qualidade do ar para este gás.



Em seguida, tem-se a região residencial urbana do Boqueirão, seguidas por Assis e pelo centro de Curitiba com valores já muito próximos.

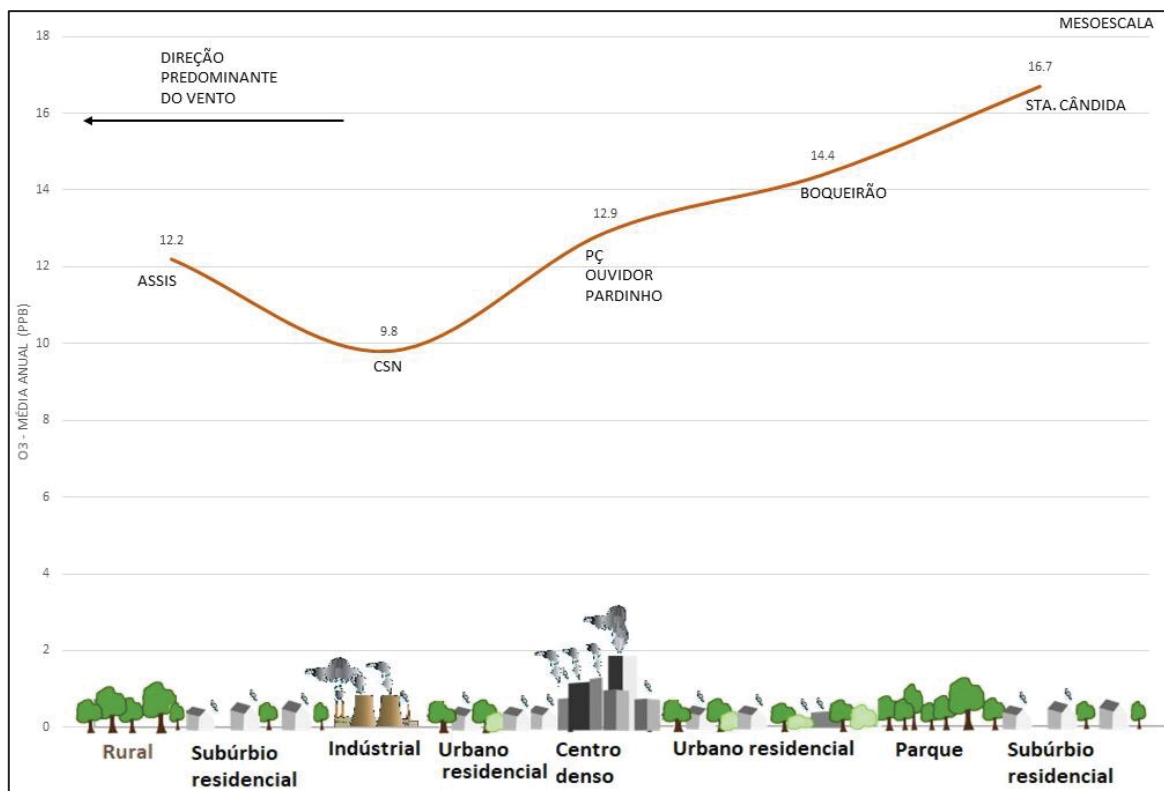
**FIGURA 34 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por NO<sub>2</sub>**



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019)

O Ozônio troposférico foi apresentado como o único dentre os poluentes analisados nesta pesquisa, classificado como secundário. Portanto sua origem não se encontra diretamente na queima de combustível fóssil, mas sim na interação entre os óxidos de nitrogênio (NO<sub>2</sub> e NO), os Compostos Orgânicos voláteis e a temperatura do ar.

Os dados coletados nos permitem concluir o papel fundamental que os VOC's e a temperatura apresentam na formação do Ozônio. A literatura aponta que, regiões próximas a áreas verdes e/ou rurais tem potencial para apresentar uma média mais elevada de O<sub>3</sub> em função da presença de Compostos Orgânicos Voláteis de origem biológica, mais abundante em zonas assim caracterizadas (PARRA et. al., 2006; FANIZZA, 2014).

**FIGURA 35 – AUC – Urbanização e poluição do ar em mesoescala por O<sub>3</sub>**

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019)

Esta primeira aproximação dos dados de poluição sobre o AUC nos possibilitou observar a influência da região industrial e da zona central da área de estudo sob a qualidade do ar da região. A seguir, serão apresentados os modelos de dispersão atmosférica que aprofundarão as análises já realizadas.

#### II.1.1 A Construção do Modelo de Dispersão Atmosférica

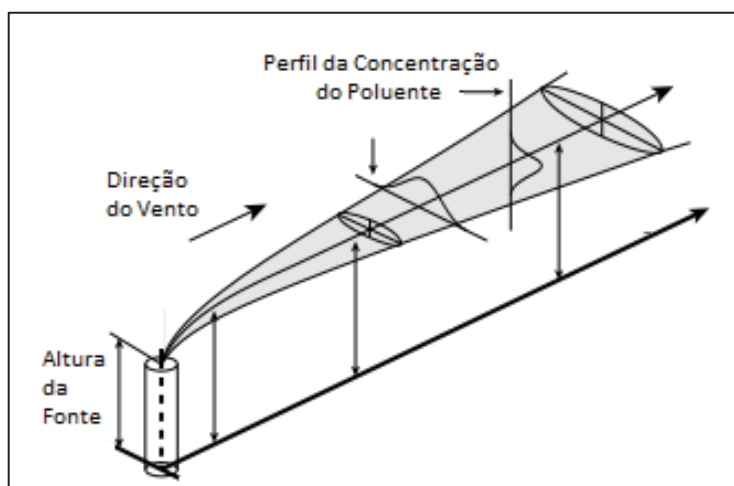
Optou-se por simular a dispersão dos poluentes pelo AUC utilizando um Modelo de Dispersão do tipo Gaussiano/Lagrangeano.

O modelo Gaussiano/Lagrangeano de dispersão parte do pressuposto de que as emissões são contínuas. Assim, faz-se necessário como *input* do modelo, tanto a localização da fonte quanto o total de poluentes por ela emitida. A aplicação de um modelo deste tipo apresenta limitações espaço/temporais. Recomenda-se sua utilização para modelar áreas urbanas ou industriais específicas, sendo mais recomendado para distâncias médias de 100 metros a 20 km da fonte emissora (SMHI,2015).

Hanna et. al., (1982) atestam a proximidade dos dados produzidos por modelos gaussianos com dados primários, além de apontar sua consistência

com a natureza aleatória dos momentos de turbulência e apresentar certa simplicidade em sua concepção matemática. A figura 36 traz um esquema básico da concepção da pluma de dispersão de uma fonte fixa pelo modelo gaussiano, indicando a curva de concentração vertical e horizontal do poluente após sua emissão, em função da direção do vento.

**FIGURA 36–** Pluma de Dispersão do Modelo Gaussiano

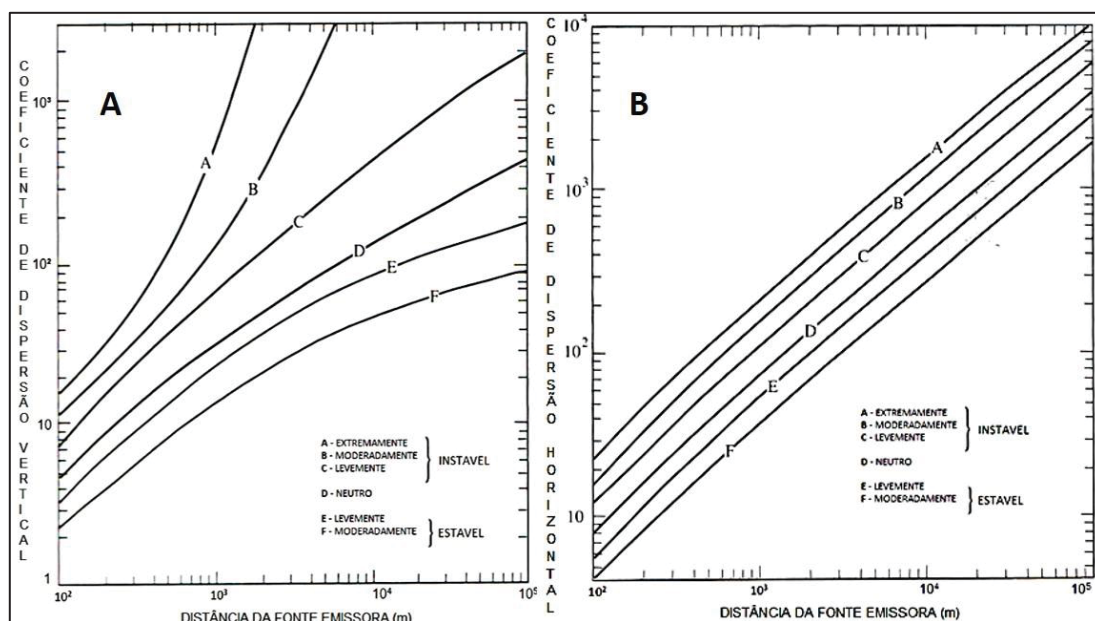


FONTE: Adaptado de Hanna et. al., (1982)

As limitações destes tipos de modelos são muitas, entre elas Martins et. al., (2015) apontam que para a simulação de Modelos de Dispersão Gaussianos/Lagrangianos supõe-se um cenário de ventos constantes, unidirecionais e variabilidade meteorológica limitada. Cita-se também o fato de o presente modelo apresentar um cenário hipotético utilizando dados em escala temporal anual, portanto, a riqueza de detalhes em termos de valores absolutos se perde, contudo, pode-se ter uma boa ideia geral de sua oscilação e dispersão no espaço.

A turbulência da atmosfera é pré-determinada em até sete níveis diferentes, indo de extremamente instável até moderadamente estável, baseado na classificação de Pasquill (1961). A figura 37 aponta os perfis de coeficientes de dispersão atmosférica vertical (A) e horizontal (B) em um modelo gaussiano a medida que se afasta da fonte, por tipos de instabilidade.

**FIGURA 37–** (A) Distância da Fonte Emissora x Dispersão Vertical; (B) Distância da Fonte Emissora x Dispersão Horizontal



FONTE: Adaptado de Seinfeld e Pandis (2006)

Verifica-se que, nos casos de maior instabilidade, a relação dispersão x distância da fonte é menor quando comparado às demais situações atmosféricas, seja na dispersão horizontal, seja na vertical.

Para a construção deste modelo, buscaram-se dados de emissões de poluentes oriundos dos órgãos públicos responsáveis por dita coleta. Assim, buscou-se organizar e sintetizar os Inventários de Emissões realizados pelo IAP com dados para todo o estado do Paraná, e pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Curitiba com dados específicos para o município em questão.

Ambos os inventários dispunham de fontes emissoras para o ano de 2013, com informações na mesma escala de análise, sendo que, as fontes do inventário da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Curitiba eram consideradas de menor magnitude e por isso não relacionadas no relatório do IAP, de forma que as informações em ambas se complementam.

Os dois documentos indicam a localização das fontes emissoras fixas (indicada na figura 14, e comentada no capítulo I) e o total de poluentes emitidos ao longo do ano. A Portaria 150 de 2013 do IAP estabelece as regulações, critérios e exigências para o chamado “auto monitoramento”, função esta que abastece os bancos de dados dos inventários com

informações fornecidas pelas próprias empresas. Para os modelos gerados nesta pesquisa, foram utilizados dados oriundos dos inventários publicados em 2013 por ambos os órgãos, por se tratarem dos documentos mais recentes publicados até então.

O inventário realizado pelo IAP tem foco nas indústrias maiores, enquanto que o da SMMA o complementa, apontando as fontes menores dentro do município de Curitiba. Estes dois inventários trazem informações apenas para os poluentes CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>.

Os modelos aqui apresentados tratarão apenas dos poluentes NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub><sup>1</sup>, visto que terão suas relações com o clima de Curitiba futuramente descritas no próximo capítulo. O ozônio por sua vez, por tratar-se de um poluente secundário<sup>2</sup> não é mensurado na fonte pelas indústrias como os demais, o que também impede a geração de um modelo de dispersão a seu respeito nesta fase.

Após a organização do banco de dados, pode-se então passar a etapa da construção do modelo de dispersão em si. Os dados dos inventários apresentam-se em escala anual, assim, de igual forma seguiu-se com a constituição do modelo.

O mesmo foi gerado a partir da plataforma *Airviro* desenvolvida pela Instituto Sueco de Meteorologia e Hidrologia. Esta plataforma *on-line* permite ao usuário inserir o banco de dados de fontes fixas e gerar modelos baseados em cenários meteorológicos pré-determinados.

Além destas informações, utilizou-se como *input* do presente modelo dados de topografia da região de estudo do satélite SRTM fornecidos pelo IPPUC, além de dados da altitude média das edificações da cidade estimados por imagens de satélite da plataforma *Google Earth*.

O ajuste dos níveis de turbulência embasou-se no estudo de Krugger e Rossi (2015). Os autores levantaram informações meteorológicas de Curitiba em 2004 e apontaram que em cerca de 64% dos dias daquele ano a atmosfera da cidade foi classificada como moderadamente instável.

---

<sup>1</sup> Tanto PM<sub>10</sub> quanto PTS referem-se a material particulado, contudo, o PM<sub>10</sub> diz respeito a partículas com até 10 µg/m<sup>3</sup> e não é coletado por todas as estações de monitoramento do IAP, o que explica a utilização do PTS na primeira parte da pesquisa.

<sup>2</sup> O ozônio origina-se de reações químicas envolvendo radiação solar compostos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis conforme visto no capítulo I deste trabalho.

Em relação aos ventos, observou-se no estudo de Castelhana e Roseghini (2018) a prevalência da direção Leste e Nordeste em todos os meses do ano para a cidade de Curitiba, sendo que as demais direções se mostraram com poucos percentuais ao longo dos meses.

O mesmo estudo também demonstrou pouca variabilidade na velocidade dos ventos, com o mesmo fluando em média entre 1 m/s e 3m/s ao longo do ano.

Deste modo, e partindo do pressuposto de que os modelos aqui gerados embasarão uma análise generalizada da dispersão de poluentes no AUC, foram gerados quatro cenários comparativos para a execução dos modelos:

- I – Atmosfera Moderadamente Instável com ventos na direção Leste e velocidade média de 1,5 m/s
- II – Atmosfera Moderadamente Instável com ventos na direção nordeste e velocidade média de 1,5 m/s
- III – Atmosfera Moderadamente Estável com ventos na direção Leste e velocidade média de 1,5m/s
- IV – Atmosfera Moderadamente Estável com vento na direção nordeste e velocidade média de 1,5 m/s

Optou-se por trabalhar o cenário hipotético de moderadamente estável a título de comparação com os cenários encontrados por Kruger e Rossi (2015).

Os quatro cenários propostos seriam então, os tipos predominantes de dinâmica de ventos no AUC, e juntos, seriam as situações com mais ocorrência.

O fato do modelo simular apenas uma direção predominante prejudica a análise de efeitos na mudança da direção dos ventos, e suas consequências sob a dispersão dos poluentes.

Ressalta-se que os modelos a seguir não apresentam dados de emissões por fontes móveis, de modo que, os mesmos representam apenas a dispersão e efeito das emissões fixas (indústrias principalmente) sob o AUC.



### II.1.2 Análise dos Modelos de Dispersão

Os modelos gerados, baseados nos dados apenas de fontes fixas, reafirmam o papel do vento na formação e dispersão da pluma de poluentes, e reforça a região de Araucária e do CIC como os pontos mais problemáticos do AUC.

A análise proposta aqui será complementar aos gráficos discutidos no item anterior, e nos permitirá compreender a dinâmica dos poluentes oriundos das fontes fixas no âmbito do AUC.

Por se tratar de uma escala ainda ampla, que abrangem grandes distâncias e diversas realidades de uso do solo do AUC, tal análise situa-se ainda no âmbito da meso escala e nos permitirá observar com mais escala de detalhe o efeito industrial sob a qualidade do ar na área de estudo.

A figura 38 traz os dados dos três poluentes modelados sob a Situação I, na qual os ventos são moderadamente instáveis com direção Leste e velocidade média de 1,5 m/s, a situação mais habitual para a região de Curitiba, conforme estudos apresentados no capítulo I.

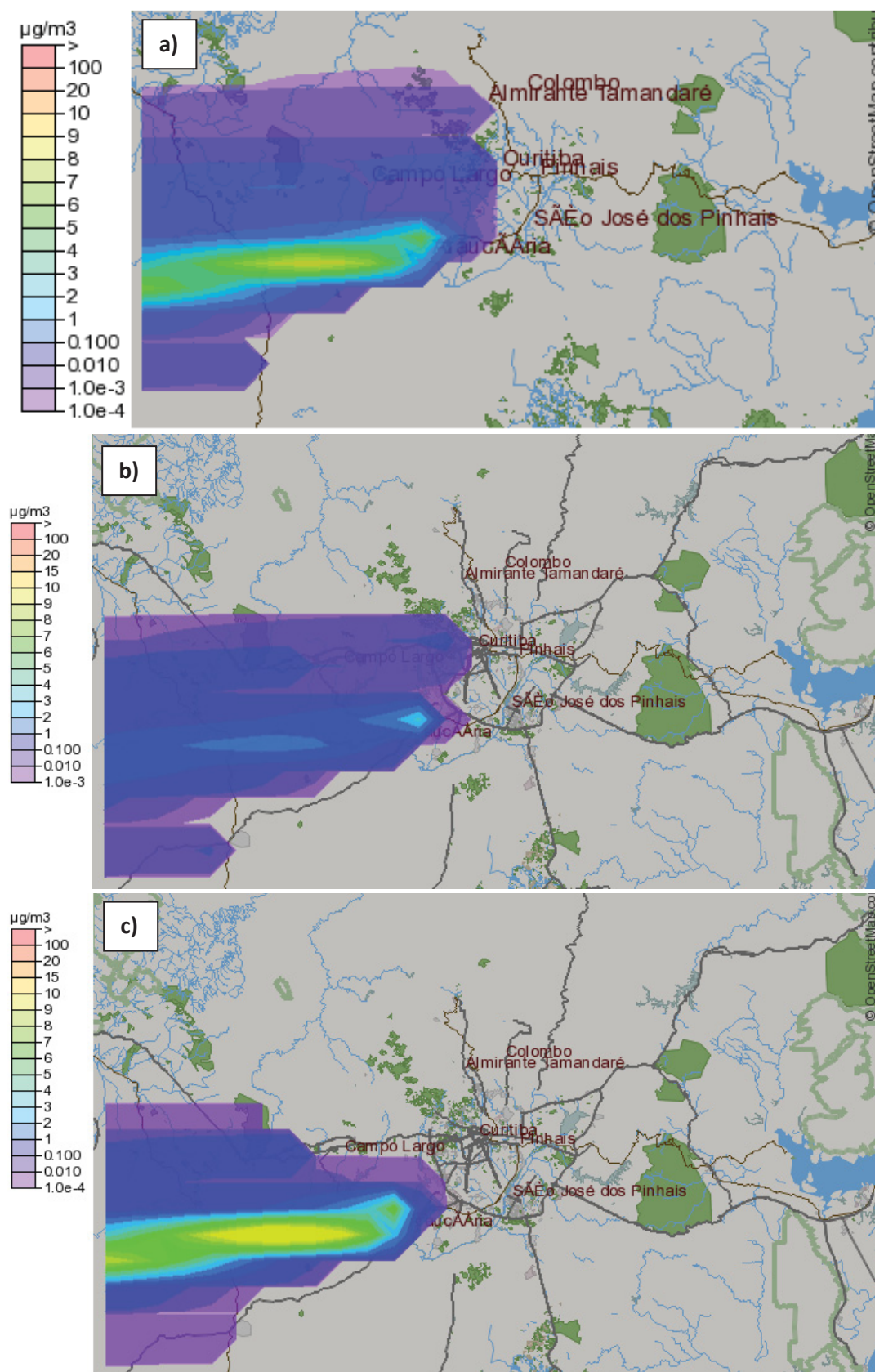
Percebem-se as plumas de dispersão se formando a partir da porção Leste da capital paranaense dirigindo-se aos municípios vizinhos de Contenda, Balsa Nova e Campo Largo, até os limites do Primeiro Planalto, deixando nítida a ação do vento como condicionante a dispersão de poluentes.

Os poluentes SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> apresentaram maiores concentrações. As simulações com PM<sub>10</sub> indicaram que muito pouco deste composto tem sua origem nas fontes emissoras fixas, apesar de sua pluma se arrastar por vários quilômetros, os valores de concentração aqui simulados são considerados muito baixos.

Além da extensão horizontal da pluma, chama a atenção à ausência de concentração de poluentes a partir da região central de Curitiba nos sentidos Leste e Norte.

Tal fato nos indica que a poluição registrada nestas regiões, que inclui além do centro os bairros Boqueirão e Santa Cândida, que possuem estações de monitoramento da qualidade do ar, tem na fonte móvel a sua principal fonte emissora.

**FIGURA 38– AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário I.- 2013 a) NO<sub>x</sub>; b) PM<sub>10</sub>; c) SO<sub>2</sub>**



FONTE: IAP (2013). Org.: Castelhana (2019)

Alterando a configuração do modelo para o cenário II, mantêm-se os ventos moderadamente instáveis e com uma velocidade média de 1,5m/s, mas altera-se a direção predominante dos ventos de Leste para nordeste. Segundo os estudos apresentados no ultimo capítulo, a direção nordeste é a segunda com mais predominância ao longo do ano, e a predominante nos meses de junho a agosto.

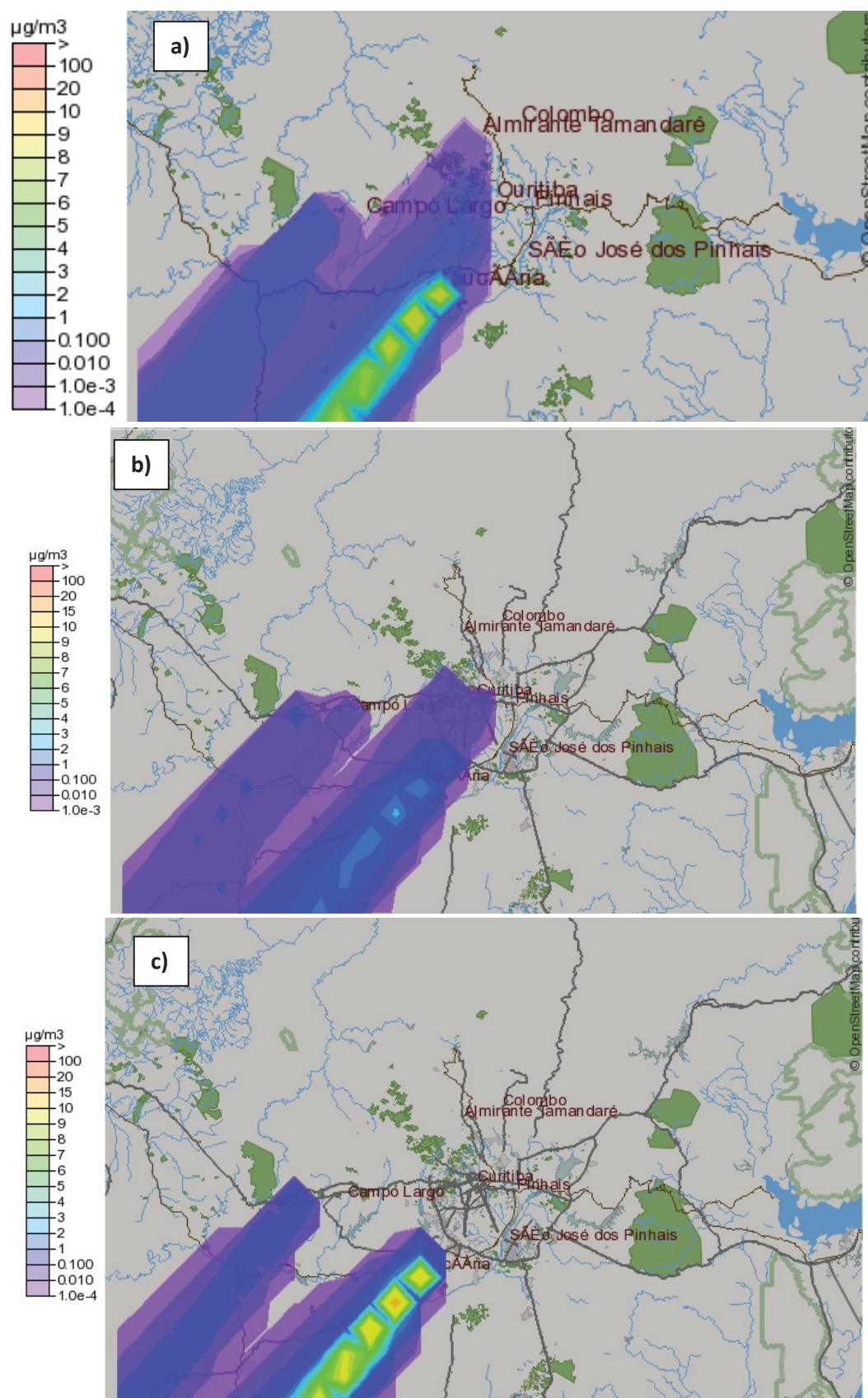
A figura 39 demonstra os resultados obtidos a partir desta simulação. Observa-se o efeito do vento na dispersão novamente. As plumas desta vez estendem-se da região Sudoeste do aglomerado urbano de Curitiba até os municípios de Lapa, São Mateus do Sul e se dirigindo até a divisa com o estado de Santa Catarina.

A pluma de dispersão do NO<sub>x</sub> novamente mostrou-se como a mais intensa, com concentrações muito altas a partir do parque industrial de Araucária e também na região de Campo Largo.

A pluma de dispersão do SO<sub>2</sub> diferente das demais se inicia em Araucária seguindo sentido Sudoeste, sequer atingindo Curitiba.

Novamente observam-se na simulação as regiões centrais, Leste e Norte da capital sem indícios de concentração de poluentes.

**FIGURA 39– AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário II.- 2013 a) NO<sub>x</sub>; b) PM<sub>10</sub>; c) SO<sub>2</sub>**



FONTE: IAP (2013). Org.: Castelhana (2019)

A partir desta simulação pode-se perceber também o efeito das indústrias na região de Campo Largo sob a pluma de poluição. De fato, as indústrias desta localidade apresentaram mais efeito na qualidade do ar simulado do que as indústrias de São José dos Pinhais, polo de indústrias automotivas, e também as indústrias das regiões de Colombo e Almirante Tamandaré, localidades estas com indústrias de extração e fabricação de Cal.

A partir do cenário III, parte-se para uma análise da dispersão sob condições atmosféricas consideradas moderadamente estáveis, portanto um cenário não habitual segundo a literatura consultada, para a região de Curitiba.

As simulações deste cenário, portanto, além da situação atmosférica mais estável apresenta ventos com velocidade média de 1,5 m/s e direção predominante Leste.

Em situações de maior estabilidade atmosférica, os poluentes apresentam menores taxas de dispersão, apresentando valores maiores de concentração.

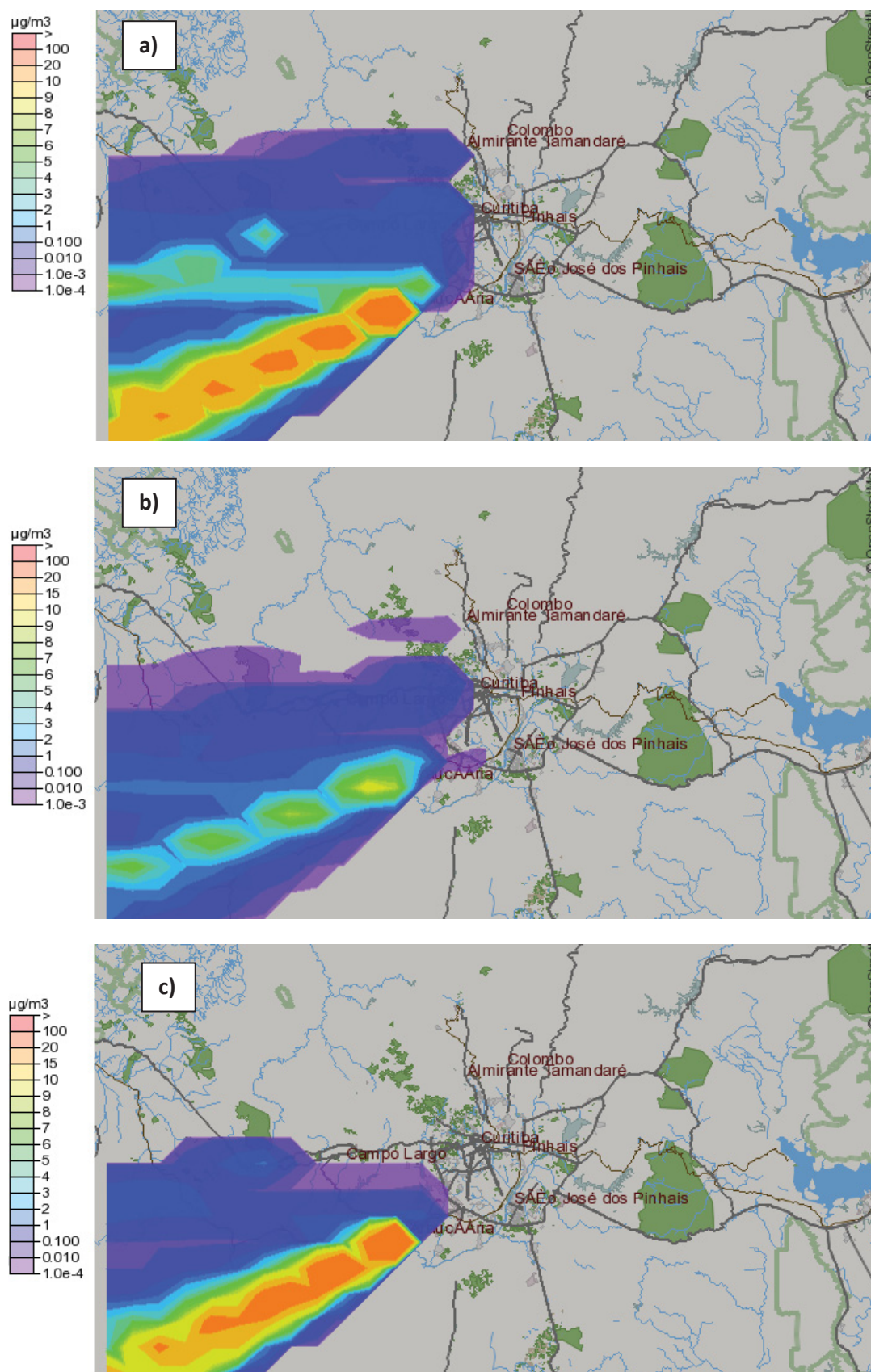
A figura 40 retrata esta situação. Comparando-a com as duas simulações anteriores, percebe-se, pela gradação de cores maiores concentrações para os três poluentes projetados.

A diferença maior na concentração se deu nas simulações com o poluente PM<sub>10</sub>, nos dois primeiros cenários, as concentrações médias projetadas não ultrapassavam 3µg/m<sup>3</sup>, no cenário III, todavia, sua concentração máxima chega a ultrapassar 10 µg/m<sup>3</sup>, reafirmando a estabilidade atmosférica como condicionante chave na dispersão.

A modificação na estabilidade atmosférica alterou também a direção da pluma. Ventos mais estáveis a tornam menos extensa. Os valores mais intensos ficam mais restritos as áreas próximas às fontes emissoras, e a diminuição gradativa na concentração, à medida que se distancia da fonte, é maior.



**FIGURA 40–** AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário III - 2013 a) NO<sub>x</sub>; b) PM<sub>10</sub>; c) SO<sub>2</sub>



FONTE: IAP (2013). Org.: Castelhana (2019)



O último cenário, simulado pelo modelo gaussiano de dispersão de fontes fixas, levou em conta novamente uma situação de atmosfera moderadamente estável, com ventos a velocidade média de 1,5 m/s e direção predominante de Nordeste.

Este cenário reforça a condição de dispersor dos níveis de estabilidade atmosférica e da direção e velocidade dos ventos, e nos revela uma pluma de dispersão novamente mais concentrada.

As emissões de NO<sub>x</sub> na região de Araucária seguem como as predominantes, mas as de Campo Largo ganham destaque novamente quando comparadas as regiões Leste e Norte do aglomerado urbano de Curitiba.

De forma geral, ressalta-se a ausência de concentrações de poluentes nestas áreas da região metropolitana, observada em todos os cenários aqui simulados.

Reforça-se que os modelos foram embasados por informações oficiais geradas através do já mencionado processo de auto monitoramento por parte das indústrias.

As informações aqui coletadas permitem-nos observar o papel das indústrias sobre a qualidade do ar de Curitiba, e, baseado nos dados oficiais, mostram-nos uma realidade em que as fontes fixas exercem um papel principalmente local e pouco ligado a má qualidade do ar da região central do AUC.

Os resultados apontam que os níveis altos de poluentes coletados no âmbito central são oriundos de fontes diversas as fixas e reforçam a necessidade de análises espaciais específicas na escala do micro neste ambiente urbano.

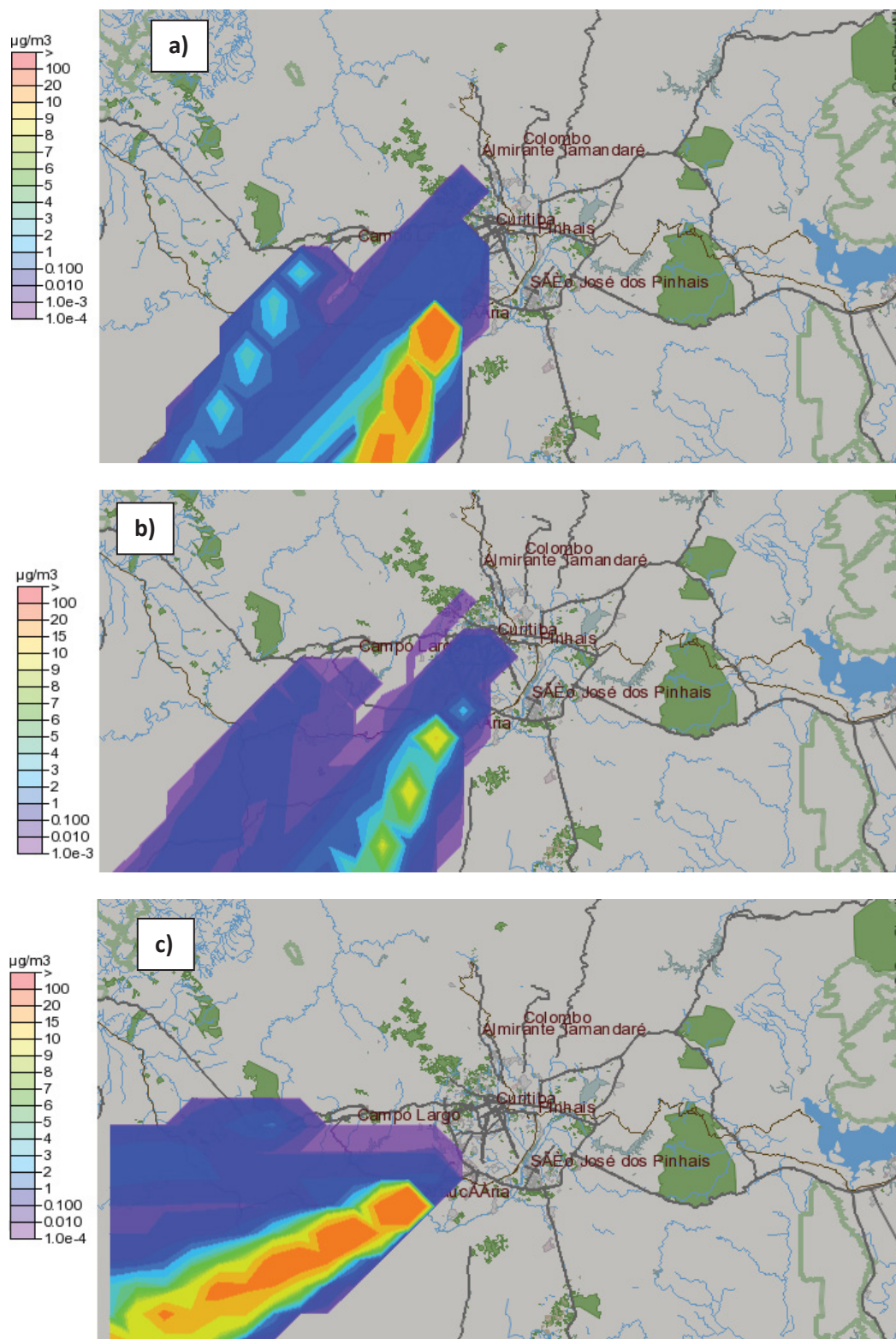
A concentração destas fontes na região Sudoeste e Oeste do AUC tornam-nas as áreas que mais sofrem suas consequências e atestam o papel determinante destas fontes na má qualidade do ar do AUC.

As condições de vento de Curitiba, todavia não permitem que as plumas geradas pelas concentrações industriais usualmente atinjam o centro da capital, dispersando-se pelas regiões Oeste e Sudoeste da RMC.

Situações menos usuais, em que os ventos teriam sua direção no sentido predominante Oeste e ou Sudoeste, situados por Castelhana e Roseghini (2018) como as situações predominantes em 10% e 6% do tempo no AUC,

respectivamente poderiam alterar esta dinâmica, condicionando piores condições de qualidade do ar na região central e mais populosa da área de estudo.

**FIGURA 41 – AUC - Modelos de Dispersão de Fontes Fixas – Cenário IV - 2013 a) NO<sub>x</sub>; b) PM<sub>10</sub>; c) SO<sub>2</sub>**



FONTE: IAP (2013). Org.: Castelhana (2019)

## II.2 QUALIDADE DO AR EM ESCALA MICRO NO AUC

### II.2.1 A Coleta de Dados Primários

Conforme mencionado no último item, a concepção de um modelo de dispersão nos moldes ao realizado, aliado a análise dos dados oriundos das estações fixas de monitoramento da qualidade, foi deveras generalista e sem muito detalhamento, objetivando uma análise em escala meso da relação entre a cidade e a qualidade do ar.

Complementando tal análise e visando uma abordagem em escala local, realizou-se uma coleta de dados primários de poluição que propiciou uma visão mais aguçada da relação entre as rugosidades do tecido urbano e a dispersão de poluentes na cidade.

Por questões logísticas e alto custo de materiais de coleta, optou-se por, nesta parte do estudo, limitar as análises a compostos de Nitrogênio, no caso NO e NO<sub>2</sub>.

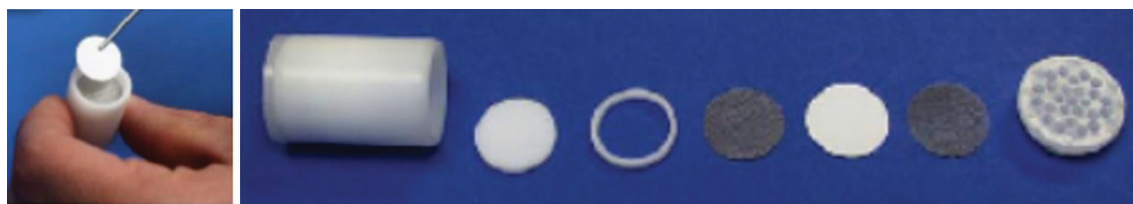
Foram realizadas duas campanhas de duas semanas cada durante os meses de julho e agosto de 2016 entre os dias 29/07/2016 a 26/08/2016, totalizando quatro semanas de coleta divididas em duas campanhas quinzenais.

Este período foi selecionado com base nas séries históricas das estações de monitoramento da qualidade do ar do IAP que o indica como aquele em que a concentração de ditos poluentes encontra-se em seu ápice e pelo fato de ser o período quando historicamente se observa menores valores de precipitação já demonstrados no capítulo I desta pesquisa.

Os registros foram realizados através de amostradores passivos Ogawa (Figura 42). O procedimento de coleta consiste em filtros com reagentes específicos para o poluente que indicarão os níveis dos mesmos em cada ponto de coleta.

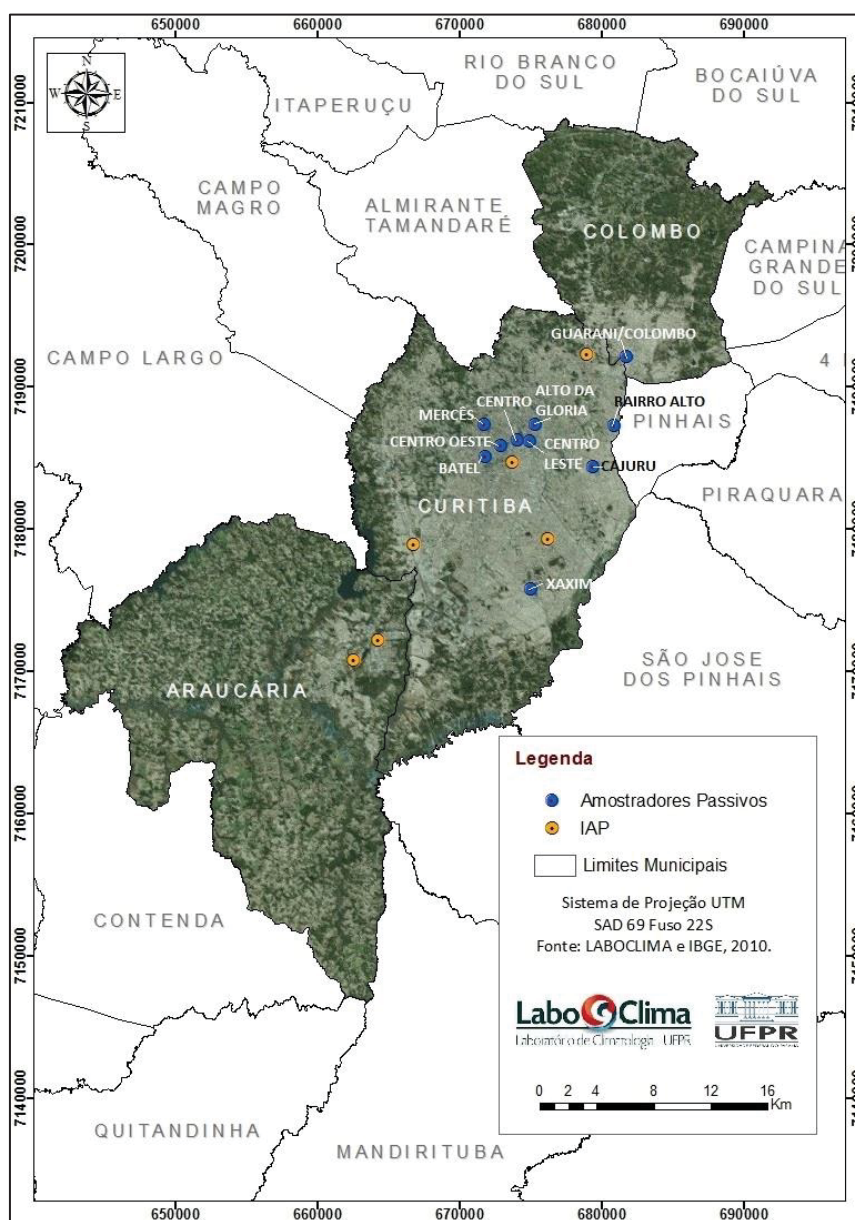
Foram dispersos onze amostradores no AUC, seguindo critérios de representatividade e localização (Figura 43), almejando contemplar níveis variados de urbanização, uso e cobertura do solo presentes na área de estudo.

**FIGURA 42–** Componentes do Amostrador Passivo Ogawa – Esquerda para Direita: Membrana reagente em destaque; Corpo plástico; Proteção lateral; Anel fixador; Tela protetora; Membrana Reagente; Tela protetora; Proteção externa vazada.



FONTE: Página Oficial dos Amostradores Ogawa<sup>3</sup>

**FIGURA 43- AUC -** Localização dos Amostradores Passivos Utilizados na Campanha de Dados Primários



FONTE: Laboclima (2016) e IBGE (2010). Org.: Castelhana (2019)

<sup>3</sup> Disponível em: <https://ogawausa.com/passive-sampler/>



A descrição de cada ponto de coleta está apontada na tabela 6. Cada local representa uma realidade urbana distinta e cobrem toda a área urbana do município.

Entende-se que a descrição dos pontos com base em suas características do uso do solo irá refletir os valores de poluição coletados, e reafirmando o caráter sistêmico e multifatorial da dinâmica da qualidade do ar no AUC.

Cada ponto de coleta, em função de suas características específicas de uso do solo e funções urbanas, apresentará resultados diferentes, que, posteriormente, poderão ser analisados e relacionados.


Ressalta-se que no ponto denominado “Centro” foram instalados amostradores em locais distintos de um mesmo edifício, um em nível do solo e outro no terraço, com a finalidade de se observar o efeito condicionante da verticalização e do efeito *canyon* nos valores de poluição uma vez que, a avenida onde estão localizados é marcada pela presença de altos edifícios em ambas as suas faces.

**TABELA 6–** AUC - Pontos de Coleta de dados de poluição do ar: Localização e Características relevantes.

PONTO	CARACTERÍSTICAS DO USO DO SOLO	IMAGEM
Xaxim	Residencial baixa densidade, sem verticalização, baixo tráfego de veículos. Zona Sul de Curitiba	
Cajuru	Residencial baixa densidade, sem verticalização, baixo tráfego de veículos. Próximo à linha férrea Zona Leste de Curitiba	
Bairro Alto	Residencial baixa densidade, sem verticalização, baixo tráfego de veículos. Próximo a áreas livres e várzea de rios. Zona Leste de Curitiba	

Guarani/Colombo	Residencial baixa densidade, sem verticalização, próximo a vias de grande movimento, Zona Norte de Curitiba.	
Alto da XV (Centro-Leste)	Residencial/Comercial, média densidade, pouca verticalização, topograficamente elevado e próximo a vias movimentadas. Região Centro-Leste de Curitiba	
Alto da Glória	Residencial/comercial médio-alta densidade, média verticalização. Próximo a vias movimentadas, Região centro-Norte de Curitiba.	
Vicente Machado (Centro-Oeste)	Comercial alta densidade, alta verticalização, Via c/ médio para alto tráfego. Região Centro-Oeste de Curitiba	
Marechal Deodoro (Centro)	Comercial alta densidade, alta verticalização. Via c/ alto tráfego e próximo a vias BRT. Região central de Curitiba.	
Batel	Residencial média/alta densidade, média verticalização, Vias com médio tráfego. Região Oeste de Curitiba	



Mercês	Residencial média/alta densidade, pouca verticalização, Vias com médio/baixo tráfego. Região Oeste de Curitiba	
--------	--	--

FONTE: Acervo do Autor. Org.: Castelhana (2019)

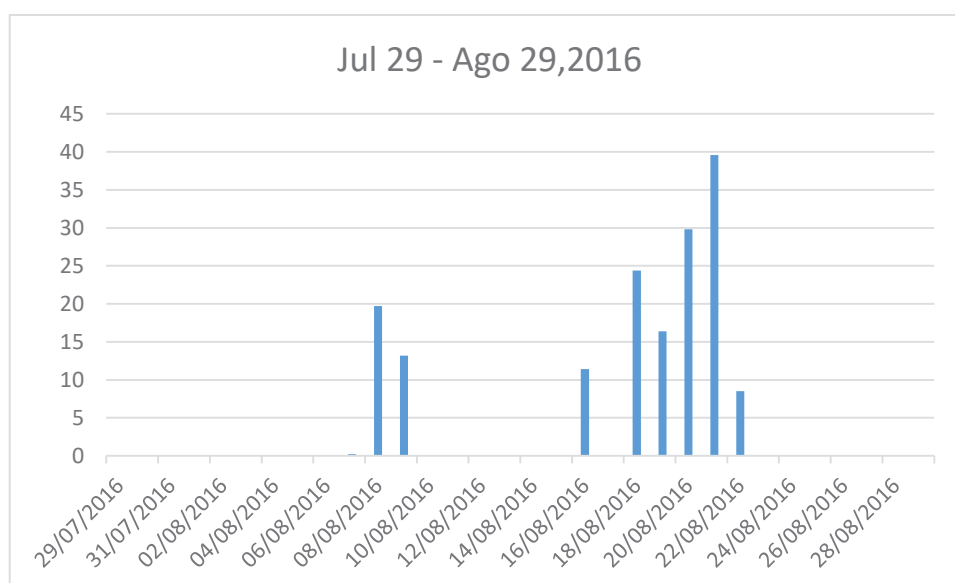
## II. 2.2 Condições Meteorológicas nas Campanhas de Coleta de Dados Primários

A realização da coleta de dados se deu no período de agosto, por ser o mês historicamente mais seco, (apontado pela figura 20 no capítulo I) e quando, na teoria, os valores de poluição encontrar-se-iam mais intensos, em consequência principalmente deste menor volume de chuva acumulada.

Todavia, especificamente em 2016, o mês de agosto mostrou-se como mais chuvoso do que sua média histórica de 75,6 mm atingindo um total de 162,8 mm.

A primeira quinzena de coleta de dados foi a mais seca, com registros de 32,7 mm concentrados nos dias 08/08 e 09/08/2016. Já a segunda quinzena, dado a manutenção de sistema frontais registrou 130.1 mm de chuva, mantendo cinco dias consecutivos com chuva entre 18/08 e 22/08/2016 e registrando um total de 39,6 mm apenas no dia 21/08 (Figura 44).

**FIGURA 44–** Registros de Precipitação durante a Campanha de Monitoramento

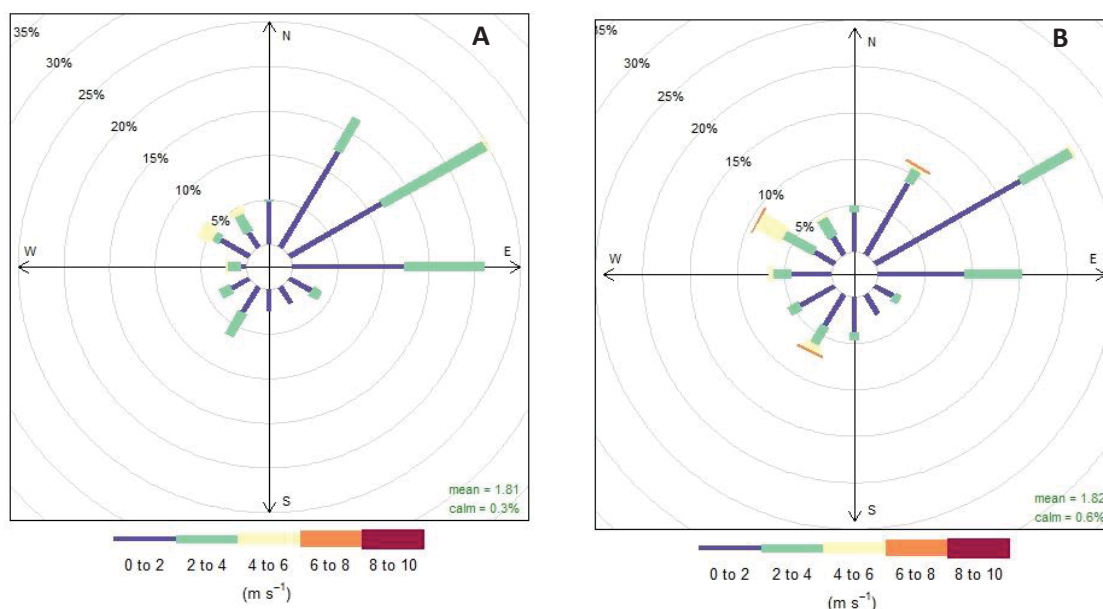


FONTE: INMET (2016). Org.: Castelhana (2019).

Nordeste e Leste foram os ventos predominantes na primeira quinzena de monitoramento com contribuições modestas dos setores Oeste, Sul e Noroeste. No segundo período o vento nordeste também prevaleceu, mas observou-se um aumento na contribuição de ventos do setor Noroeste (Figura 46).

Quando os ventos provinham de direções Noroeste observou-se também um aumento significativo em sua velocidade média (acima de 4 m/s). O padrão observado está de acordo com estudo de Castelhana e Roseghini (2018) que reportaram prevalência de ventos a Leste e nordeste em Curitiba nos meses de julho e agosto com pequenas contribuições dos demais setores.

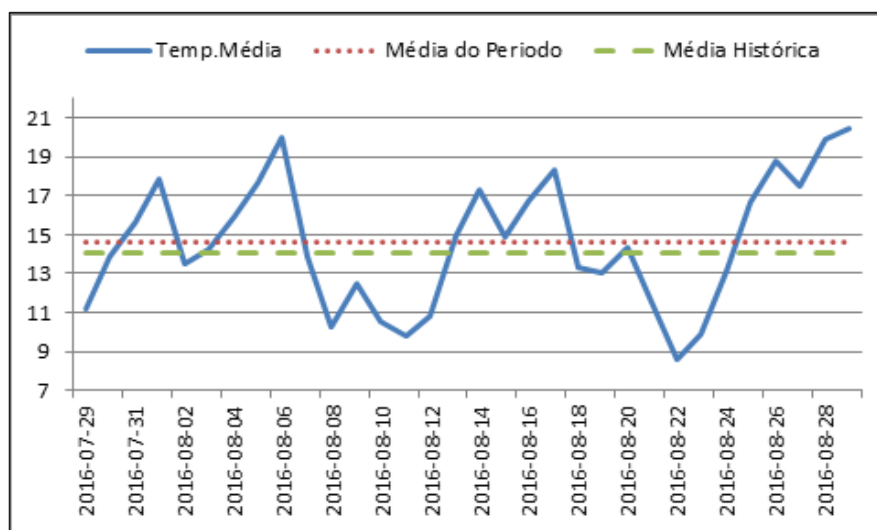
**FIGURA 45** – Velocidade e Direção do Vento em Curitiba na Primeira Campanha de Monitoramento (A) e Segunda Campanha de Monitoramento (B).



FONTE: INMET (2016). Org.: Castelhana (2019).

A Figura 46 revela a oscilação diária da temperatura média ao longo do período de coleta. A temperatura média do período (14,6 °C) mostrou-se ligeiramente inferior à média histórica de 14,8 °C. O maior valor diário registrado ao longo do período analisado foi de 20,4 °C no dia 29/08/2016 enquanto que o menor (8,6° C) foi registrado no dia 22/08/2016, portanto ambas na segunda quinzena de coleta de dados.

**FIGURA 46**– Temperatura Média Diária, Média do Período e Média Histórica durante o período de Monitoramento (29/07/2016 – 29/08/2016).

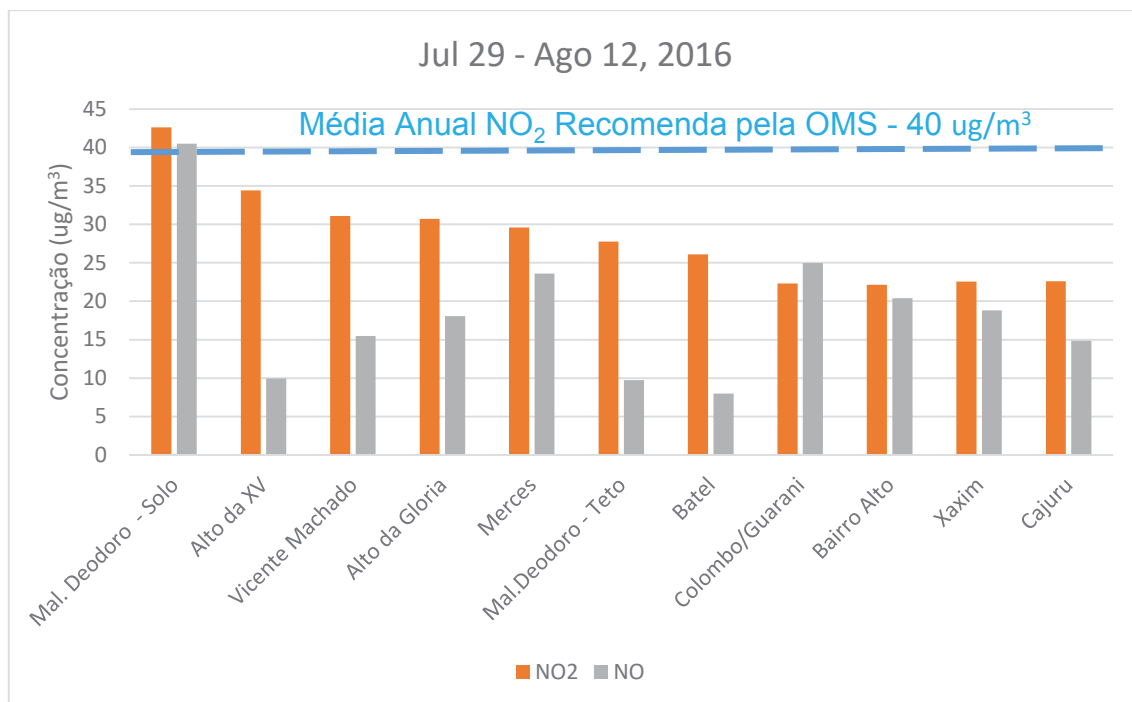


Fonte: INMET (2016). Org.: Castelhana (2019).

## II 2.3 Análise das Campanha de Coleta de Dados Primários

Conforme apontado anteriormente, foram realizadas duas campanhas quinzenais de coleta de dados de compostos de Nitrogênio. A primeira sucedeu-se entre os dias 29/07 e 12/08/2016.

A Figura 47 deflagra a oscilação de valores pelos pontos de coleta no primeiro período de análises. O ponto de coleta “centro”, local em que se sucedeu também a análise do efeito *canyon*, foi o ponto onde se observou uma concentração mais acentuada destes compostos no nível do solo. Neste ponto, os valores de NO e NO<sub>2</sub> ficaram em 42,6µg/m<sup>3</sup> e 40,4 µg/m<sup>3</sup>. Tal fato era esperado dado que, além da característica de *canyon* ali presente, esta é uma região central, com movimento constante de veículos ao longo do dia todo e está muito próxima a um dos principais corredores de ônibus da cidade.

**FIGURA 47–** Concentrações de NO e NO<sub>2</sub> nos pontos de Coleta – Primeira Campanha.

FONTE: OMS (2018). Org.: Castelhana (2019).

Percebe-se uma nítida influência do volume de veículos nos totais de NO<sub>2</sub>. Enquanto fruto direto da queima de combustíveis fósseis, este poluente foi registrado com maior intensidade nas regiões centrais e nos pontos Mercês e Batel, ambas as regiões também com alto fluxo de veículos.

A verticalização observada nos pontos Mal Deodoro, Alto da XV, Vicente Machado, Alto da Gloria e Batel também condicionaram estes valores, uma vez que restringem a circulação de ventos e dificultam a dispersão dos poluentes.

Os locais de coleta mais distantes da região central de Curitiba foram aqueles em que os valores foram mais baixos. Tanto Bairro Alto, quanto Xaxim e Cajuru registraram valores muito próximos beirando uma concentração média de 26 ug/m<sup>3</sup>.

Em todos os pontos de coleta da primeira campanha, os valores não ultrapassaram o limite mínimo da legislação brasileira de 100 ug/m<sup>3</sup> e, portanto, não podem ser consideradas como áreas de risco. Utilizando a recomendação da OMS para este poluente, todavia, observa-se que o ponto “centro” manteve uma média superior ao limite estabelecido por este órgão.

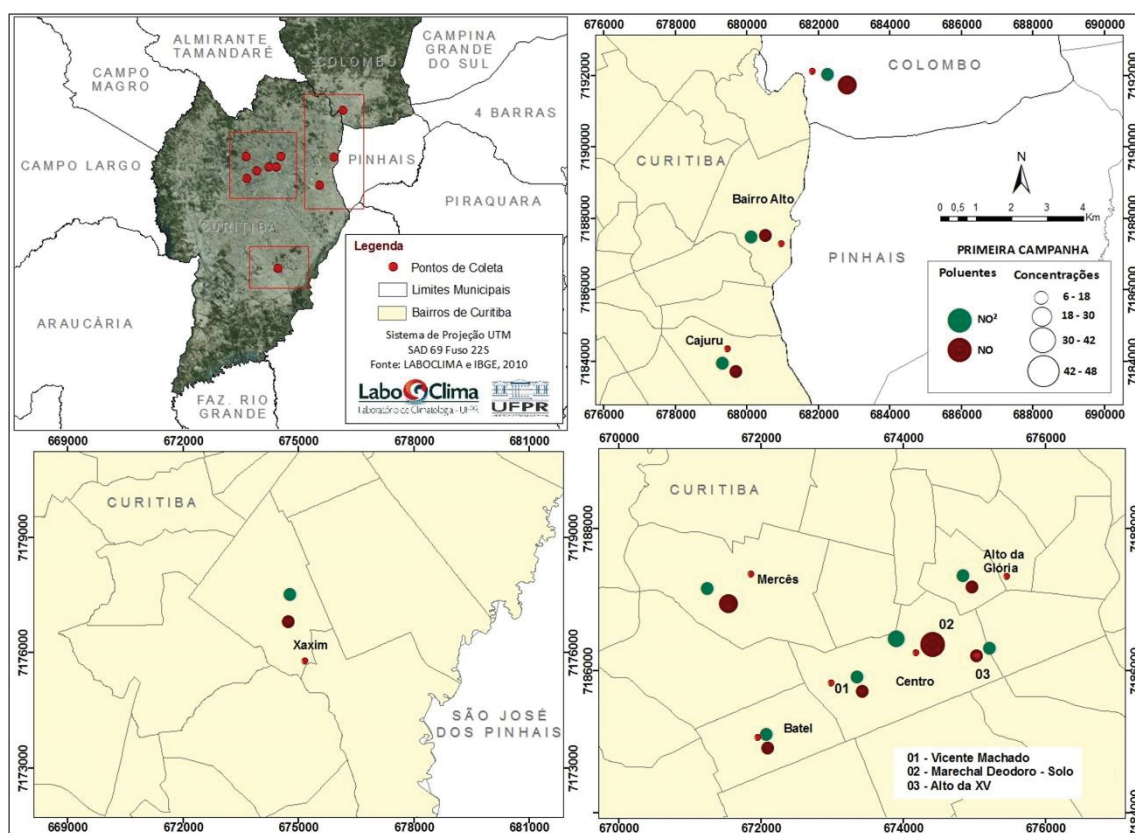
Conforme afastamo-nos da região central, é possível perceber um equilíbrio cada vez maior, entre os níveis de NO e NO<sub>2</sub>. Voltando a discussão

trazida no capítulo I, observou-se que este composto é formado a partir do processo de fotólise do  $\text{NO}_2$ . O segundo composto, em contato com a radiação solar libera como produto uma molécula de NO e um oxigênio atômico que pode reagir com o gás  $\text{O}_2$  e originar o poluente secundário  $\text{O}_3$ .

Os níveis mais altos de  $\text{NO}_2$  em relação à NO na região central advém do fato de, nesta região as emissões serem constantes e altas enquanto que nas regiões periféricas, com menos tráfego de veículos tem-se menos emissões de  $\text{NO}_2$ , e com menor constância. O  $\text{NO}_2$  sofre a fotólise e é repostado na atmosfera com intervalos de tempo mais longos na periferia em relação à região central.

Pontualmente, a figura 48 representa a distribuição dos pontos de coleta e os respectivos valores de poluição médios no período da primeira coleta. Neste caso, não é possível observar os efeitos diretos do vento como observado no modelo, mas admite-se que a manutenção de valores altos nos pontos a Oeste da região central possa também ser explicado pela dinâmica deste fator climático na cidade.

**FIGURA 48 – AUC - Distribuição Espacial das Concentrações de NO e  $\text{NO}_2$  nos pontos de Coleta – Primeira Campanha. 29-07 a 12-08-2016.**



FONTE: IBGE (2010). Org.: Castelhana (2019)

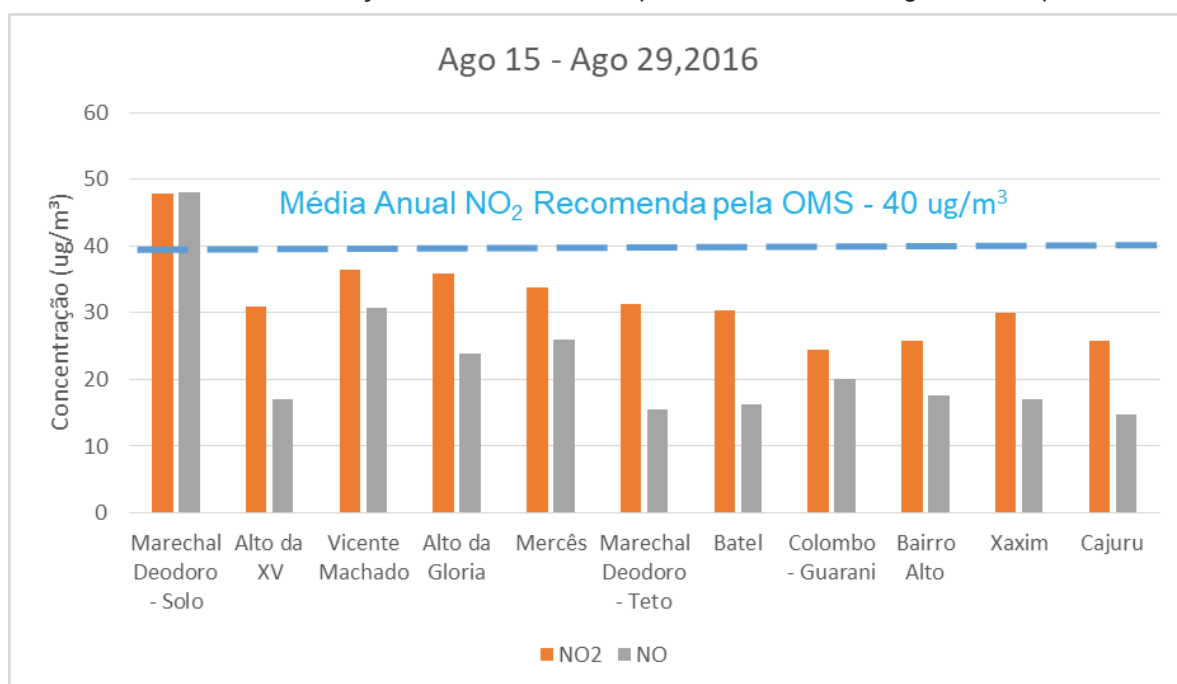
O segundo momento de coleta de dados se deu entre os dias 15/08/2016 e 29/08/2018. Os valores registrados nesta segunda campanha foram ligeiramente superiores aos da primeira, apesar do maior aporte de chuva, todavia, novamente não se encontram locais em que os valores de  $\text{NO}_2$  ultrapassassem os parâmetros legais brasileiros.

Novamente os maiores valores registram-se no ponto junto a Avenida Marechal Deodoro a altura do solo e junto à região central da cidade. A diferença entre o ponto ao solo e aquele junto ao teto foi de  $16,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para o  $\text{NO}_2$  e de  $32,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando diminuições de 35% e 68% respectivamente, levando em conta que a distância entre os dois pontos era próximo a 70 metros e novamente deflagrando o efeito *canyon* como um elemento condicionante a má qualidade do ar em vias da região central da cidade.

Comparando os valores coletados no teto do ponto centro, perceb-se a proximidade com os coletados nos pontos Vicente Machado, Alto da Gloria, Mercês, Batel e Alto da XV, regiões próximas ao centro e também com significativo tráfego de veículos.

Os demais pontos centrais de Curitiba também registraram valores elevados com especial ênfase ao ponto Alto da Gloria e Vicente Machado, chegando a  $36,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $35,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente (Figura 49).

**FIGURA 49**– Concentrações de NO e  $\text{NO}_2$  nos pontos de Coleta – Segunda Campanha.



FONTE: OMS (2018). Org.: Castelhana (2019).



Novamente é possível perceber a influência da densa urbanização na região central de Curitiba, ao que compete os valores de NO e NO<sub>2</sub>, quando se constata que os pontos periurbanos, Colombo/Guarani, Bairro Alto, Xaxim e Cajuru tiveram os menores registros. Os menores valores registrados foram de 25,8 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> e 14,8 µg/m<sup>3</sup> de NO ambos no ponto Cajuru.

Analizando estes dados em conjunto aos modelos de dispersão, reafirma-se o papel dos veículos automotores como grandes responsáveis pelas emissões e má qualidade do ar no AUC, sobretudo em suas regiões centrais, Norte e Leste.

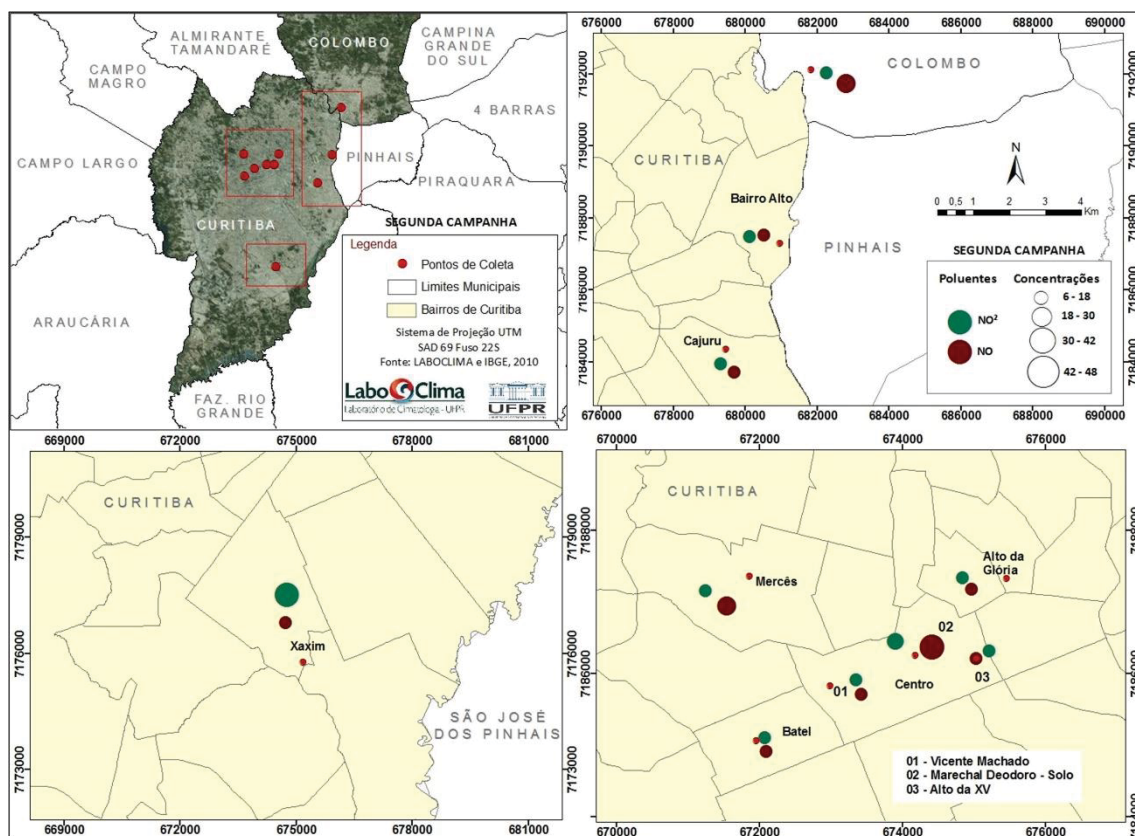
As simulações de dispersão indicaram que a poluição por compostos nitrogenados oriunda de fontes fixas praticamente inexistente na região central de Curitiba, sob as condições mais comuns de direção e velocidade dos ventos, que foram também as condições predominantes durante os períodos de coleta.

Assim, pode-se atribuir os níveis de poluição registrados nas coletas como frutos diretos dos processos de produção do espaço urbano da cidade, seja pelas emissões de fontes móveis, sejam pela ausência de políticas públicas eficazes ou adensamento urbano que dificulta a dispersão destes materiais.

O mapa da figura 50 revela essa diferença entre a região central e a periurbana, revelando o papel da mobilidade urbana como o principal desencadeador de uma má qualidade do ar na RMC.

Analizando o cenário urbano de Curitiba através das medidas coletadas em campo, pode-se observar alguns fatores espaciais que colaboram para a má qualidade do ar da cidade, e sua relação com a forma como o espaço urbano se produziu na capital.

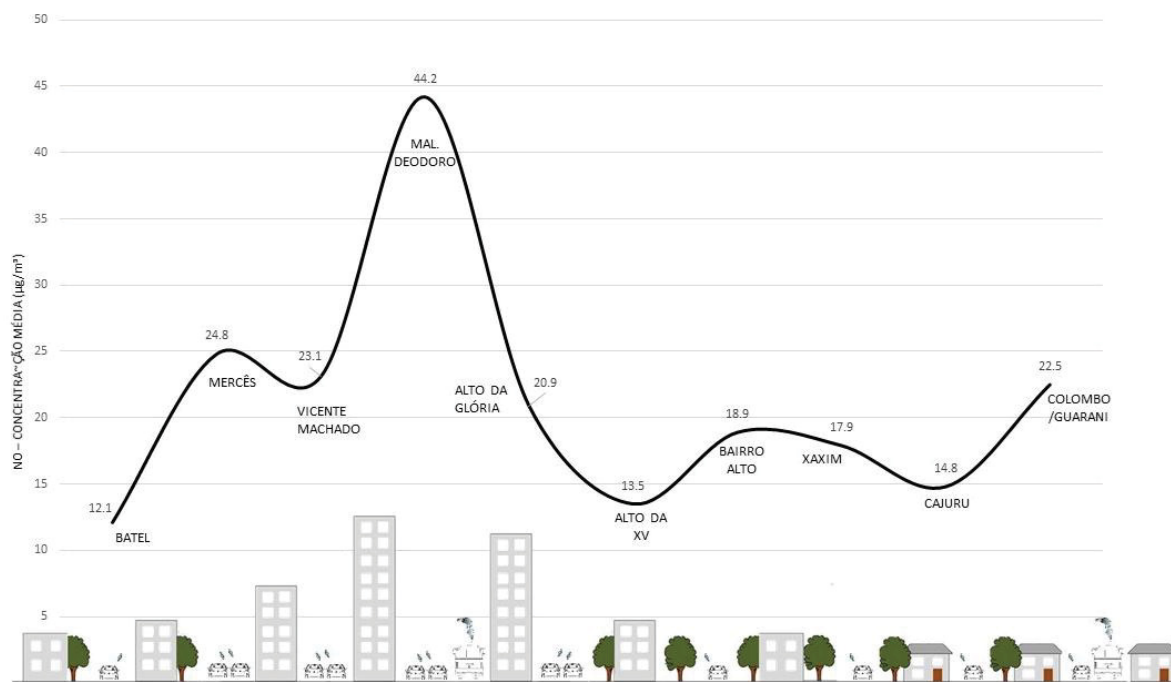
**Figura 50– AUC - Distribuição Espacial das Concentrações de NO e NO<sub>2</sub> nos pontos de Coleta – Segunda Campanha. 15-08 a 29-08-2016.**



FONTE: IBGE (2010). Org.: Castelhana (2019)

As figuras 51 e 52 trazem os resultados médios de NO e NO<sub>2</sub> respectivamente, coletados em campo no inverno de 2016. O esquema em perfil caracteriza os pontos de coleta de acordo com suas características de uso do solo, trânsito, arborização e verticalização, apresentadas na tabela 6 neste mesmo capítulo.

Observa-se, por exemplo, que o ponto Marechal Deodoro, apresentou os valores maiores para ambos os poluentes, em decorrência de sua característica urbana, como um ponto com alta circulação de veículos, inclusive de ônibus, e por ser uma região bem verticalizada e distante de áreas verdes.

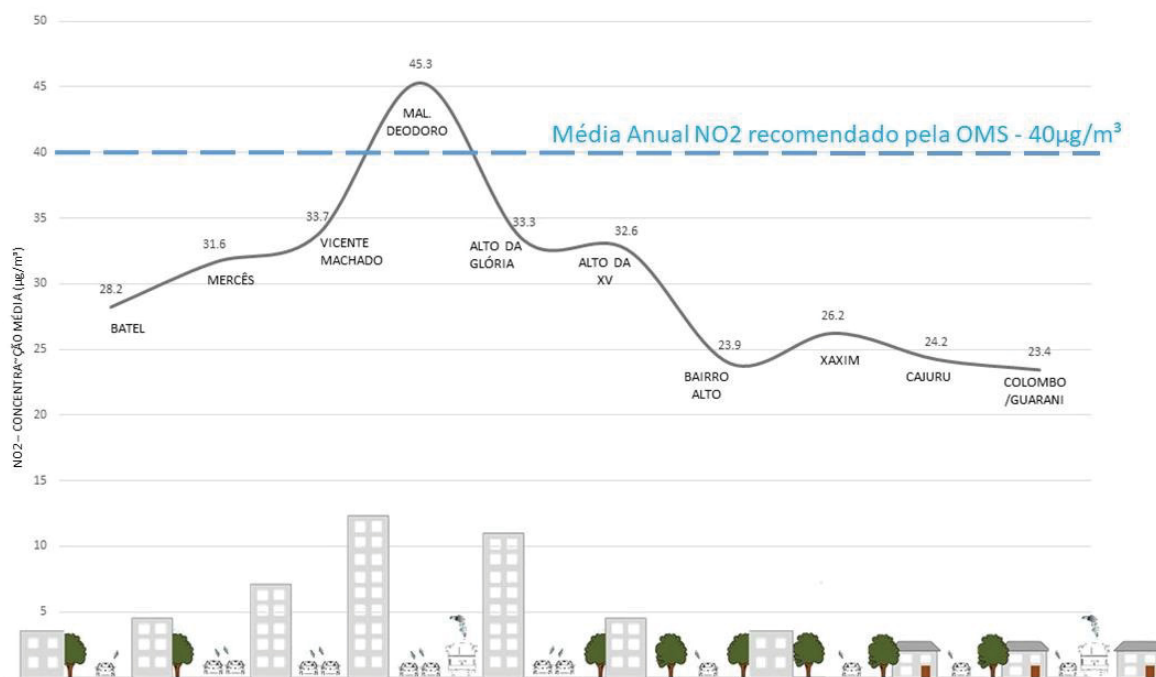
**FIGURA 51 – AUC – A poluição em Microescala do NO.**

FONTE: OMS (2016). Org.: Castelhana (2019).

Afastando-se da região central representada pelo ponto da Avenida Marechal Deodoro os valores médios passam a cair gradativamente. Chegando aos valores mais baixos nas estações Cajuru e Colombo/Guarani, ambas as áreas distantes do centro adensado, com vias de pouco movimento e casas térreas.

O bairro do Alto da XV, apesar de próximo ao centro, apresenta uma grande quantidade de espaços verdes, além de topograficamente ser um ponto elevado, localizando-se junto a um divisor de águas da sub-bacia do rio Juvevê e do Rio Belém e, no ponto específico da coleta, apresentar baixa verticalização, o que a torna um ponto de fácil circulação de ventos, auxiliando os processos de dispersão.

O papel da verticalização sob a má qualidade do ar fica mais explícito quando se observa o efeito *canyon* detectado no ponto Marechal Deodoro, em que, em uma distância vertical de pouco mais de 60 metros, observou-se uma diferença significativa nos níveis de poluição do ar.

**FIGURA 52** – AUC- A poluição em Microescala do NO<sub>2</sub>.

FONTE: OMS (2016). Org.: Castelhana (2019).

A conclusão deste capítulo reafirma a importância dos elementos apresentados como determinantes para a compreensão da dinâmica espacial dos poluentes atmosféricos. Constatou-se a influência das fontes fixas no AUC em meso escala, especificamente sobre a região Oeste e Sudoeste da área de estudo, condicionados pela direção dos ventos. Mais do que isso, constatou-se também o pouco efeito destas fontes sobre as regiões mais habitadas do AUC, relegando as fontes moveis, o papel de principais fontes emissoras destas áreas.

O papel das fontes móveis foi reafirmado ao realizarmos a análise em escala local. Revelou-se que a oscilação espacial nesta escala é regida principalmente pelo fluxo de veículos, podendo ser condicionada pelo uso do solo (presença de parques e áreas livres) e principalmente pela verticalização elemento que potencializou os valores de poluição coletados na área central em decorrência do efeito *canyon*.

Compreendidos os elementos que determinam a distribuição espacial dos poluentes, no capítulo a seguir serão analisadas as condições climáticas que propiciam o acúmulo ou dispersão dos mesmos no âmbito do AUC.

Pode observar-se também o efeito específico da ação dos ventos sob dispersão dos poluentes aqui apresentados, além de demonstrar o papel determinante do efeito urbano e das indústrias sobre a má qualidade do ar no AUC.



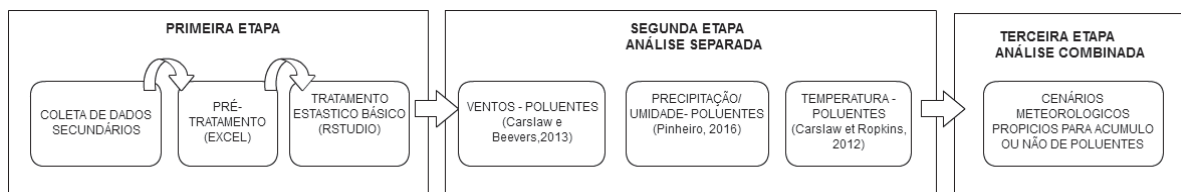
### CAPÍTULO III – A TEMPORALIDADE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: INTERAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS CLIMÁTICOS E A POLUIÇÃO DO AR NO AUC

Analizados os elementos que determinam a distribuição espacial dos poluentes sobre o AUC, procurar-se-á neste capítulo elucidar os elementos climáticos que condicionem as situações de dispersão e acúmulo dos compostos químicos.

Procurar-se-á responder quando e por quê, no AUC, os níveis de poluição do ar variam, seguindo a proposta do objetivo específico I, e apontado por Phillipe (2004) como algo de suma importância e complexidade, dado que as relações entre o tempo meteorológico e os níveis de poluição não são simples ou lineares, além de servir como base para o objetivo específico III que será discutido no próximo capítulo.

A figura 52 aponta a sequência metodológica desta etapa. O processo se iniciou com coletas de dados meteorológicos e de poluição do ar para o período entre 2005 e 2014, totalizando 10 anos de dados, uma amostra significativa para estabelecer relações estatísticas. Os dados meteorológicos utilizados neste estudo – temperatura, vento, umidade e precipitação - foram fornecidos pelo SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná.

**FIGURA 53-** Fluxograma Metodológico: Elementos do Clima e Qualidade do Ar



Org.: Castelhana (2019).

Para os dados de qualidade do ar, foram utilizados os dados dos mesmos poluentes e das mesmas estações apresentadas no capítulo anterior, complementando a análise espacial realizadas.

Assim, foram realizadas análises temporais de O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e PTS para as estações Santa Cândida, Praça Ouvidor Pardinho, Boqueirão, CSN e Assis.

Realizaram-se distintas análises estatísticas objetivando-se detalhar a oscilação temporal dos poluentes em cada estação, e relaciona-las com as

condições climáticas apresentadas pelos dados da estação meteorológica de Curitiba.

Para o tratamento inicial dos dados, utilizou-se o *software* Excel, pelo qual foram localizados os momentos em que os registros foram falhos e definiram-se os períodos de análise e estações a serem utilizadas.

Em seguida passou-se análise temporal exploratória dos poluentes com a utilização do *software* RStudio, proporcionando uma primeira visualização da relação entre a sua dinâmica e os fatores meteorológicos em escala anual, semanal e horária.

Foram gerados gráficos indicando a flutuação temporal média dos poluentes por dia da semana, hora do dia e mês do ano.

Após isto se passou a análise do comportamento de cada poluente em relação às variáveis climáticas específicas - precipitações, temperatura, direção e velocidade dos ventos e umidade relativa do ar- as técnicas utilizadas serão descritas a seguir.

Posteriormente, realizou-se uma análise climática geral dos piores episódios de cada poluente. Foram selecionados quatro episódios ilustrativos para se afunilar a escala de análise, observar o comportamento dos poluentes frente a mudanças específicas no tempo e complementar as análises particulares realizadas previamente.

Para tal fim, se utilizou como método, a análise rítmica dos tipos de tempo de Monteiro (1971), com o qual se destrincha o clima para avaliar seus componentes e definir os sistemas atmosféricos atuantes, com o auxílio de cartas sinóticas dos dias de análise fornecidas pela Marinha.

Os episódios escolhidos consistem-se no período de um mês, e suas escolhas se sucederam após a análise da variação de cada poluente em cada estação de monitoramento para cada mês dentro do período de 2005 a 2014, optando-se por trabalhar a análise rítmica nos meses em que os níveis de poluição foram considerados altos. Cada mês analisado representa um período em que um mesmo poluente se mostrou alto em todas as estações e estão descritos na tabela 7.

A seguir, serão apresentados as series temporais utilizadas e suas oscilações temporais em escala anual, mensal, dia da semana e hora do dia.

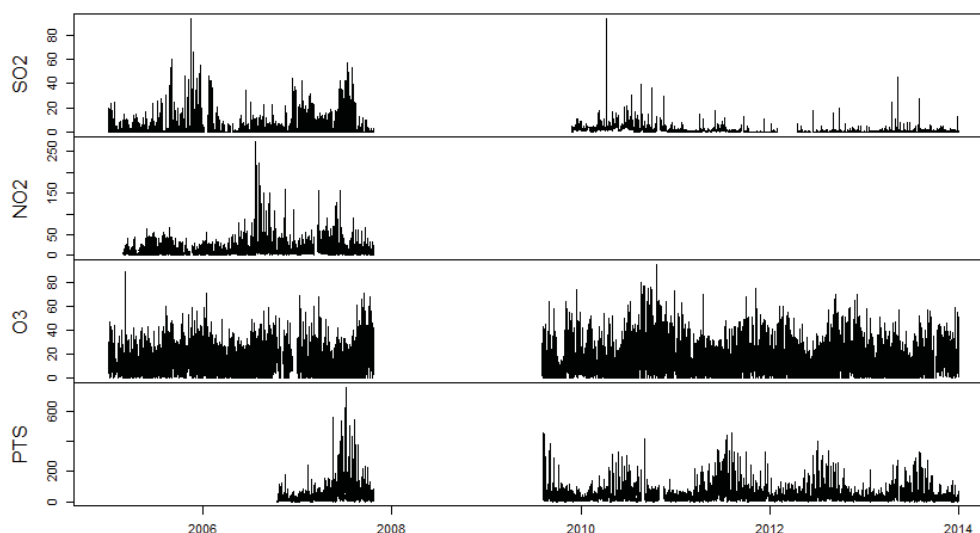
**TABELA 7**– Períodos escolhidos para Aplicação da Análise Rítmica

PERÍODO	POLUENTES ANALISADOS	ESTAÇÕES ANALISADAS
Out. /2010	O <sub>3</sub>	Todas
Abr. / 2011	SO <sub>2</sub>	Todas
Abr./2012	NO <sub>2</sub>	Santa Cândida; Pç Ouvidor Pardinho; CSN e Assis
Jul./2012	PTS	Boqueirão; Pç Ouvidor Pardinho; CSN e Assis

Org.: Castelhana (2019)

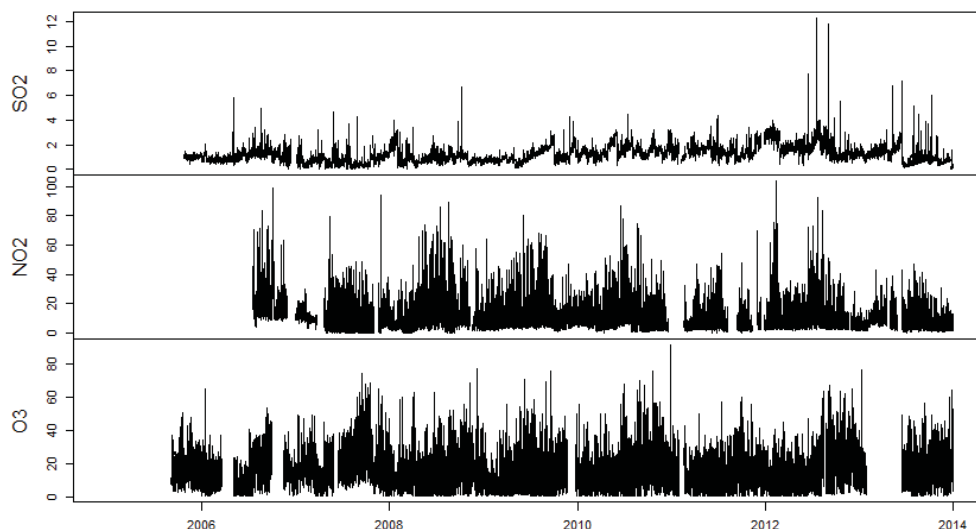
### III.1 OSCILAÇÕES TEMPORAIS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A estação alocada no bairro Boqueirão, apresentou falhas em sua série, no ano de 2008, para todos os poluentes (Figura 54). Tal falha seguiu até o final da série para o poluente NO<sub>2</sub>. Ainda deve-se ressaltar a ausência de dados de PTS para o período de 2005 a meados de 2006.

**FIGURA 54** – AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Boqueirão.

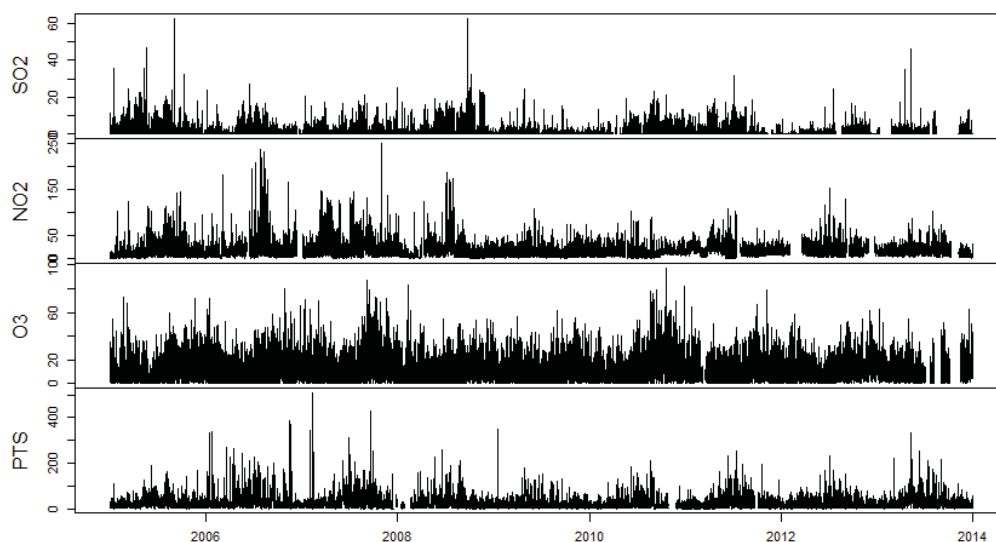
FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

Os dados coletados junto à estação Santa Cândida foram os que se mostraram com mais problemas. A série de registros de PTS está inteira comprometida e as demais apresentam uma grande quantidade de quebras até 2006 (Figura 55).

**FIGURA 55** - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Santa Cândida

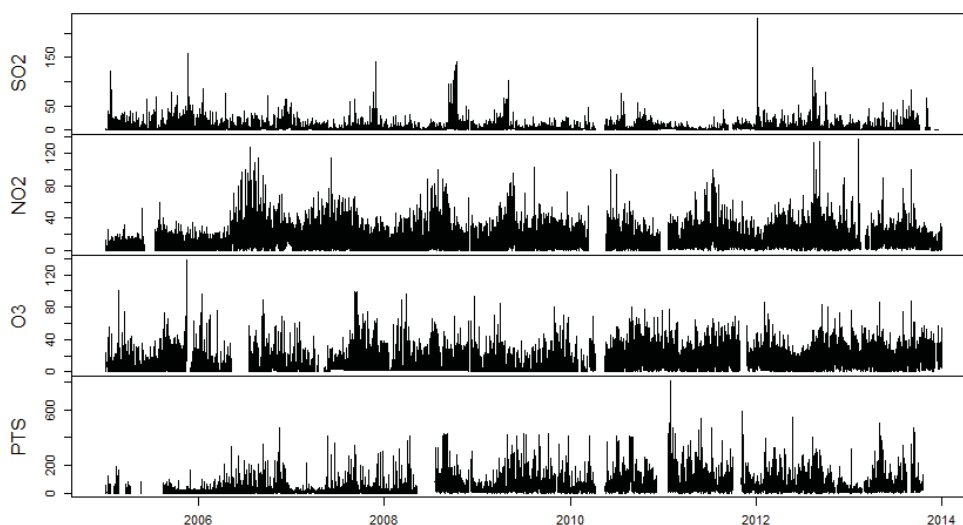
FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

A outra estação localizada no município de Curitiba, situada na Praça Ouvidor Pardiniho, apresenta uma série de dados mais concisa e com menos quebras. As poucas falhas encontram-se no ano de 2013 principalmente (Figura 56).

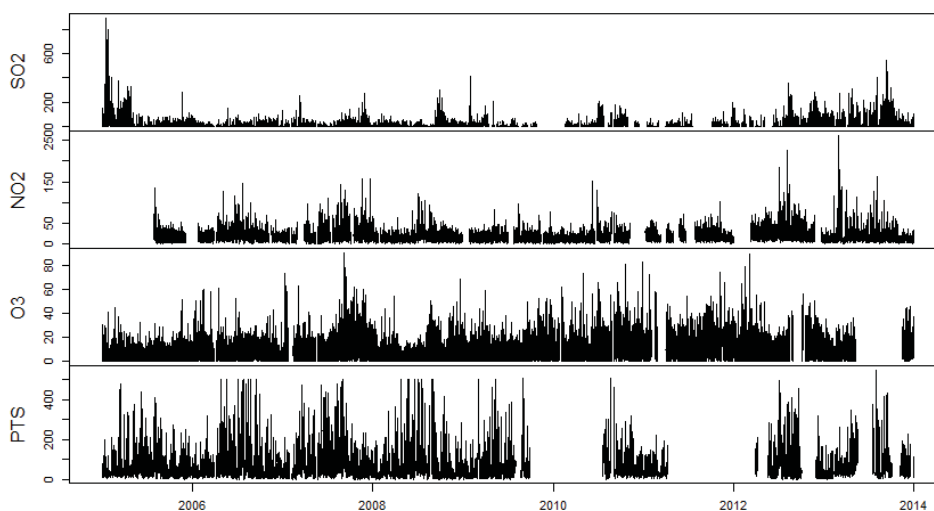
**FIGURA 56** - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Praça Ouvidor Pardiniho

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

Em Araucária, as estações Assis e CSN apresentaram sequencias de registros uniformes e com poucas falhas. As mais notadas ocorreram no ano de 2009 e 2011 na estação CSN, para o poluente PTS, as restantes foram curtos intervalos. (Figuras 57 e 58).

**FIGURA 57** - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação Assis.

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

**FIGURA 58** - AUC - Série Temporal dos Poluentes Analisados - Estação CSN.

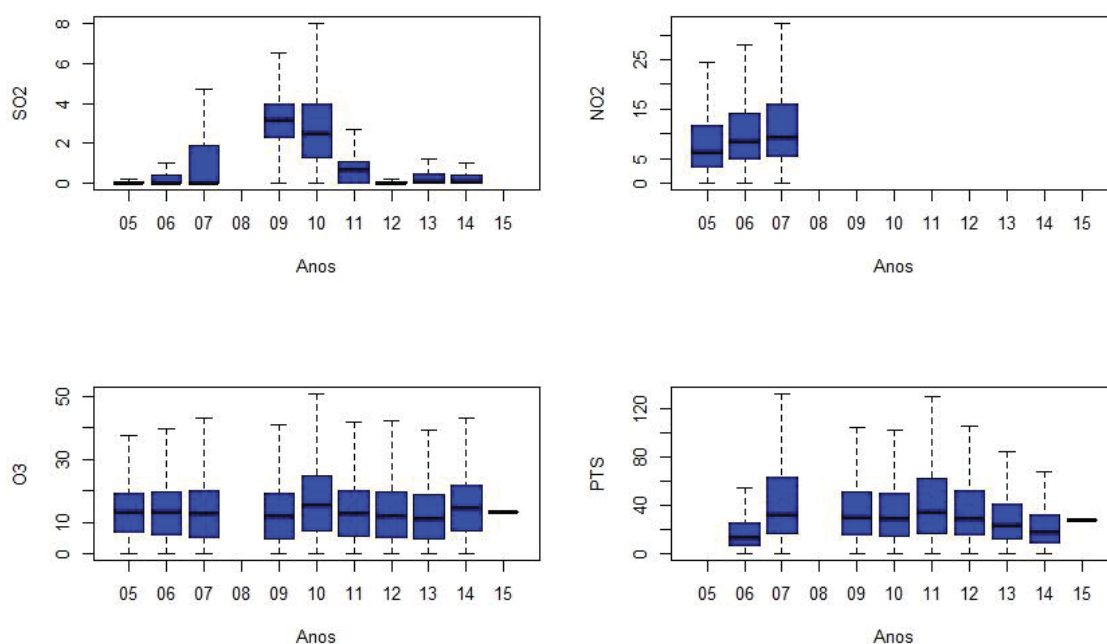
FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

### III.1.1 Oscilação Anual

Os *boxplots* gerados revelam a oscilação interanual de cada poluente para cada estação. Os resultados apontam grandes diferenças de um ano a outro.

Na figura 59 observa-se a oscilação dos poluentes na estação Boqueirão. Chama a atenção os valores de SO<sub>2</sub> que passam por um período alto no ano de 2010 para em seguida decaírem. No mesmo ano, observa-se um alto valor de O<sub>3</sub>. O PTS de 2011 até os dias de hoje encontra-se sob constante queda atingindo em 2014 seus menores níveis desde 2007.

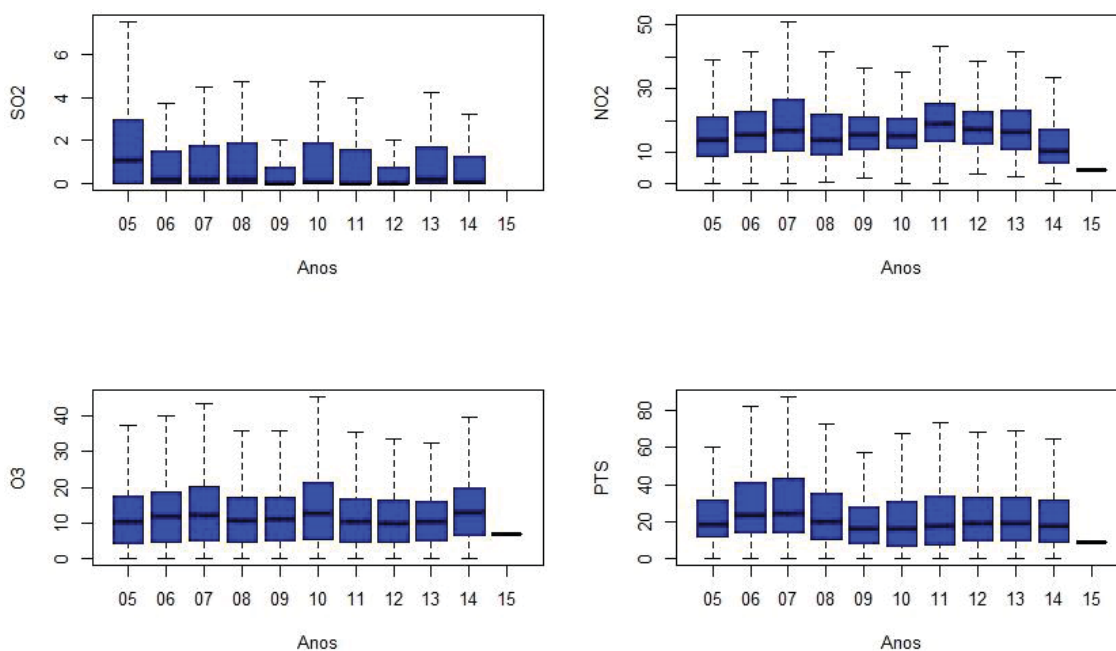


**FIGURA 59 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes- Estação Boqueirão.**

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

Na estação situada na Praça Ouvidor Pardiniho (Figura 60), percebeu-se igualmente o ano de 2010 como o com maiores valores de  $O_3$ , e um decaimento do  $SO_2$  e  $NO_2$  a partir de 2011.

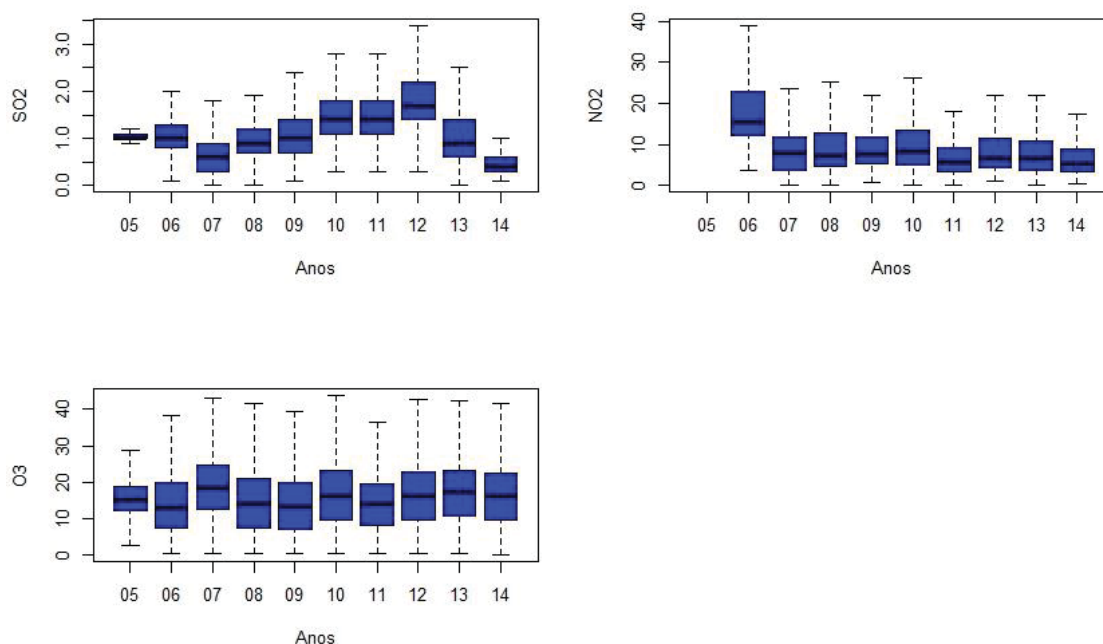
Os níveis de material particulado têm se mantido estáveis nesta estação, com anos mais altos (2007 e 2011) e anos mais baixos (2009).

**FIGURA 60 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes- Estação Praça Ouvidor Pardiniho**

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

Ainda em Curitiba, na estação Santa Cândida (Figura 61), pode-se perceber um crescimento nos valores de  $\text{SO}_2$  até o ano de 2012, quando o mesmo passa a decair deflagrando os mais baixos valores em 2014. O  $\text{O}_3$  novamente teve em 2010 um ano com altos valores, contudo, suas oscilações interanuais foram poucas. O dióxido de nitrogênio apresentou seus mais altos valores ainda em 2006, para em seguida decair e manter-se baixo.

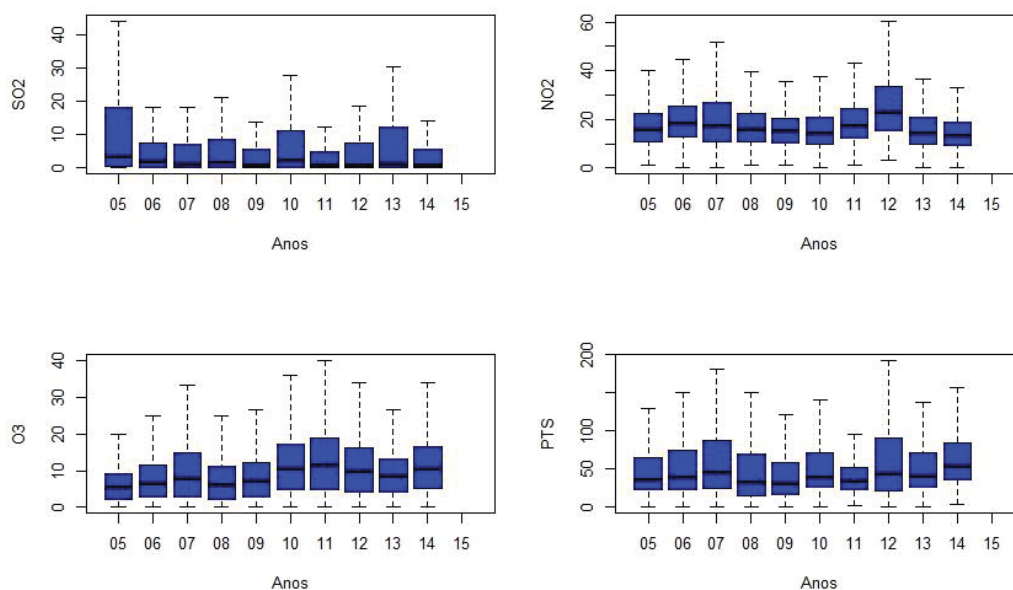
**FIGURA 61** AUC - Oscilações Anuais dos poluentes– Estação Santa Cândida



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

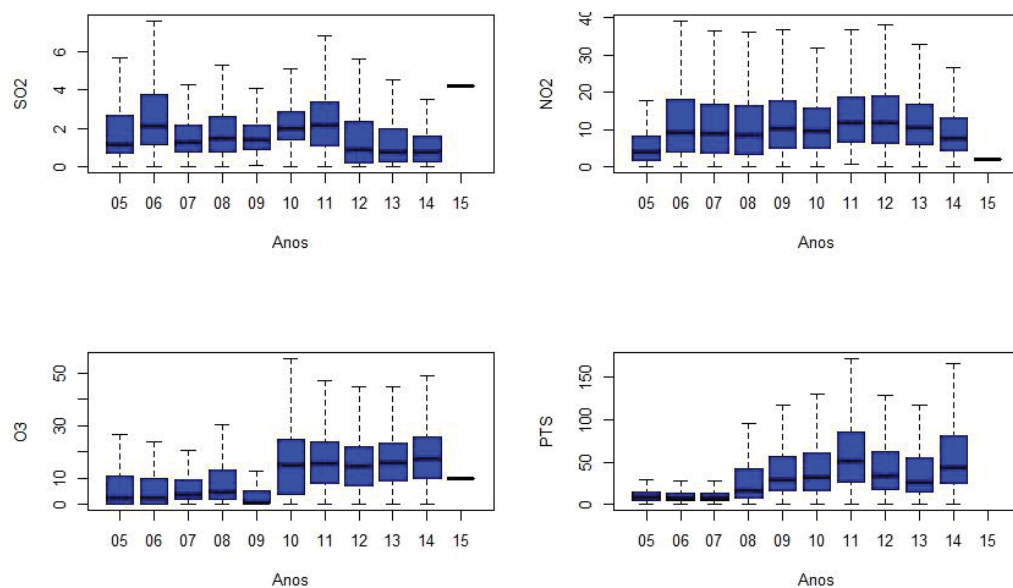
Em Araucária, a figura 62 revela a oscilação interanual de poluição para a estação CSN. O ano de 2012 destacou-se como o pior para os poluentes  $\text{PTS}$  e  $\text{NO}_2$ .

O Ozônio teve seu pior ano em 2011, apresentando melhoras até 2013 para então em 2014 voltar a ter registros altos. O dióxido de enxofre por sua vez, teve em 2005 seu pior ano, a partir de então passa a registrar sempre valores mais baixos.

**FIGURA 62 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes - Estação CSN**

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

A figura 63 apresenta as oscilações interanuais para a estação Assis, a que obteve as maiores inconformidades entre os anos. Os níveis de Ozônio desta estação são exemplo deste fato. Observa-se que a partir de 2010 os valores sobem e se mantêm altos ao longo dos demais anos. O mesmo ocorre com o material particulado a partir de 2008. A variação observada no Dióxido de enxofre sugere uma tendência a queda a partir de 2011, por outro lado no NO<sub>2</sub> observou-se uma homogeneidade ao longo dos últimos anos e ausência de tendências visíveis.

**FIGURA 63 - AUC - Oscilações Anuais dos poluentes- Estação Assis**

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

### III.1.2 Oscilações Intra-Anuais

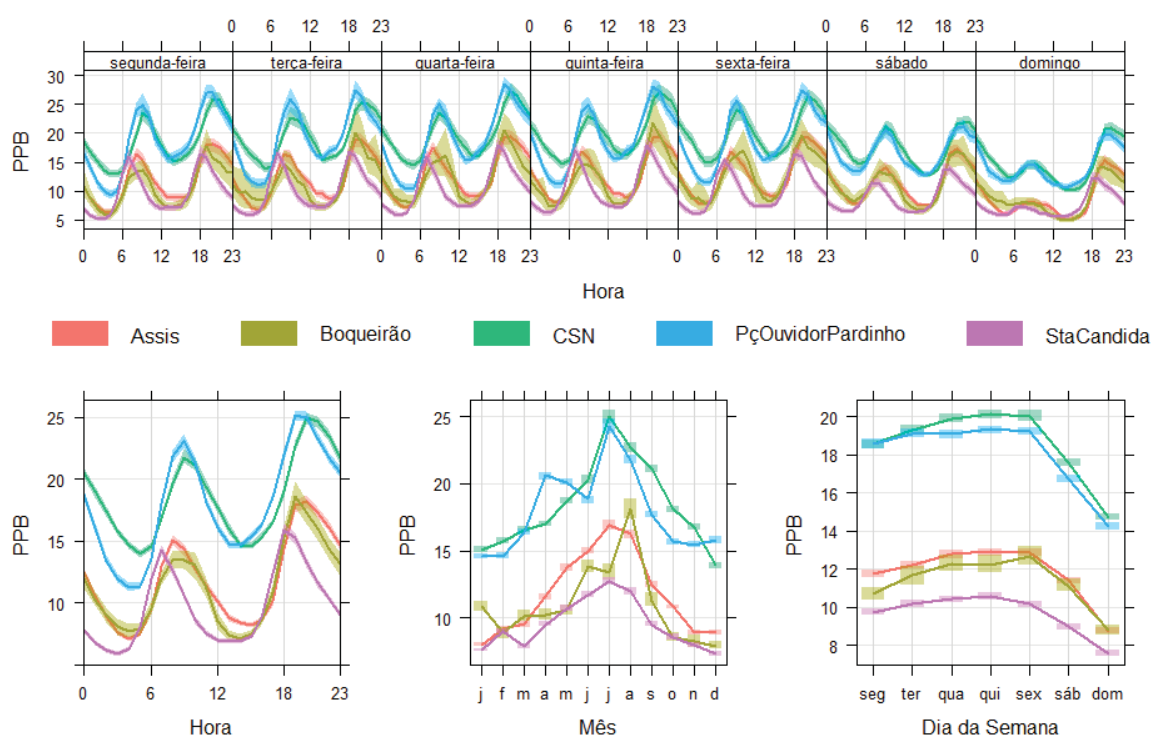
A observação do comportamento dos poluentes ao longo de um ano, são o início do processo de análise da relação entre suas respectivas dinâmicas e os fenômenos que podem vir a influenciá-las.

A figura 64 deflagra as oscilações médias mensais, semanais e diárias para o poluente  $\text{NO}_2$  nas cinco estações oficiais aqui analisadas. A série temporal indica maiores valores nas estações CSN e Praça Ouvidor Pardinho, que representam as partes industriais e urbanas densas da área de estudo respectivamente.

Ao longo da série temporal analisada, percebe-se um maior valor deste poluente no mês de julho para todas as estações de coleta, a exceção da estação Boqueirão que indicou valores mais proeminentes no mês de agosto. Os valores mais baixos foram registrados no mês de dezembro, indicando então uma relação com a dinâmica climática da cidade em escala anual.

E em uma semana, percebe-se uma nítida diminuição do poluente em todas as estações nos finais de semana, principalmente aos sábados e domingos, indicando uma intrínseca relação com fluxo de veículos, mesmo na estação CSN.

**FIGURA 64 – AUC - Oscilações Intra-anuais de  $\text{NO}_2$**



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

A oscilação diária do poluente indica dois momentos de picos distintos, o primeiro no começo da manhã por volta de 8h e o segundo no início da noite por volta de 19h, novamente nos dois momentos observa-se a relação direta com o fluxo de veículos.

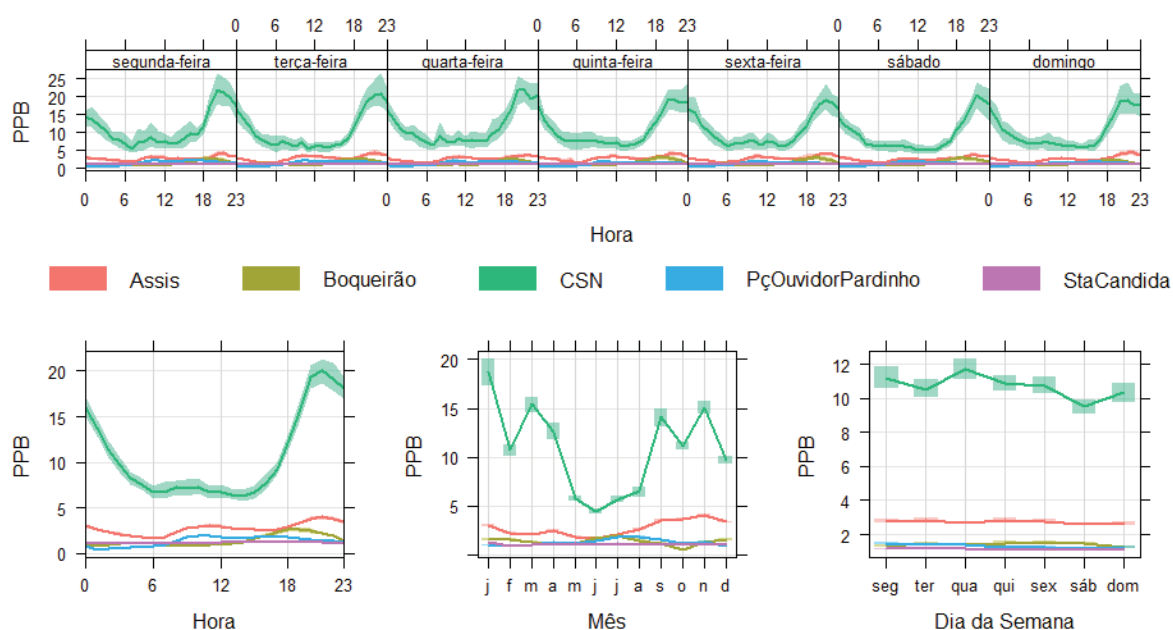
A dinâmica do  $\text{SO}_2$  por sua vez mostrou-se deveras distinta do  $\text{NO}_2$  (Figura 65). O poluente está intimamente ligado a emissões industriais, e, por este motivo, mostrou-se com maior magnitude na estação industrial CSN, com níveis visivelmente mais elevados que as demais.

Tal fato faz com que as oscilações nesta estação sejam também distintas das demais. Observou-se maiores valores no mês de janeiro e uma queda pronunciada ao longo do inverno, enquanto que nos demais pontos de coleta, o poluente manteve-se estável ao longo do ano com pequenas oscilações positivas nos meses de julho e agosto.

Observando as oscilações semanais e diárias, percebe-se também a não interferência do fluxo de veículos nesta dinâmica. Os valores nos finais de semana apresentam reduções não significativas e ao longo de um dia, observou-se também apenas um pico ocorrendo ao final do dia, próximo das 22h.

Tal fato também ocorre nas demais estações com picos maiores ao fim de dia e manutenção dos valores médios aos finais de semana.

**FIGURA 65 - AUC - Oscilações Intra-anuais de  $\text{SO}_2$**



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).



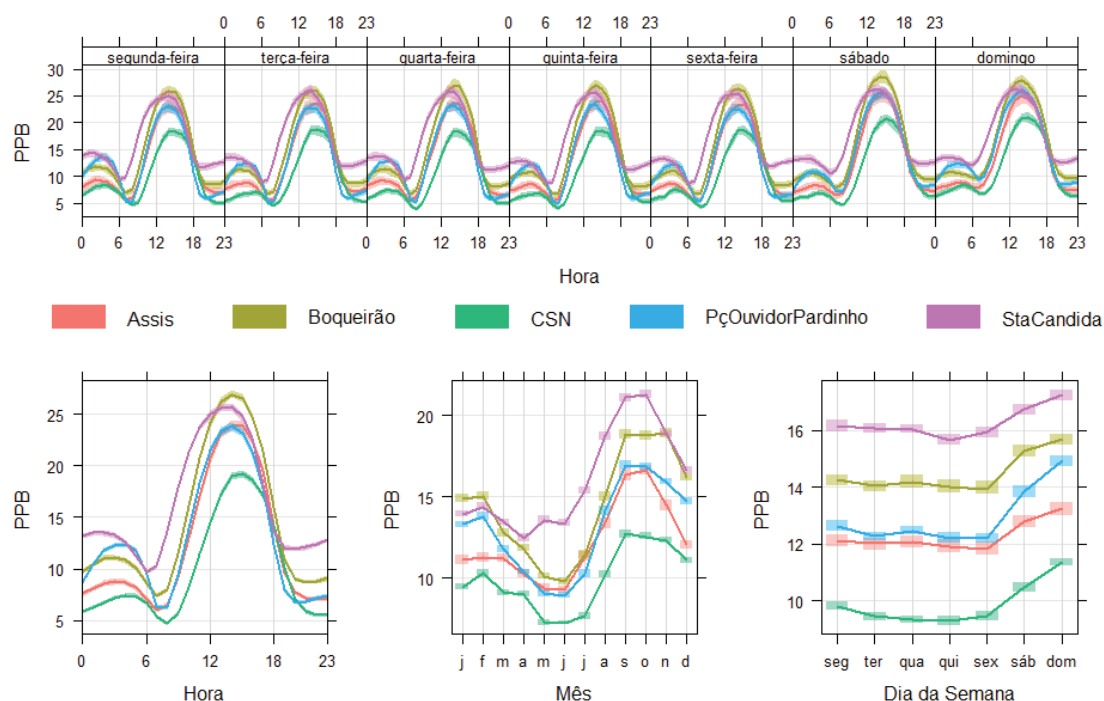
Observando a dinâmica do  $O_3$  tem-se novos padrões, ligados a gênese do poluente, explanada anteriormente, que tem como pressuposto a presença de Compostos Orgânicos Voláteis e óxidos de nitrogênio aliados à radiação solar.

Diferente das demais, a estação Santa Cândida, alocada na zona Norte de Curitiba e de baixa densidade urbana situa-se como o ponto com maiores valores médios do poluente.

Os meses de outubro e setembro são aqueles em que os valores do poluente são mais altos, enquanto que maio e junho deflagram os momentos do ano em que as concentrações são mais reduzidas (Figura 66). Este fato se justifica pela baixa quantidade de radiação solar no inverno, afetando diretamente a síntese do composto.

Igual influência é observada na dinâmica diária do ozônio troposférico, que apresenta um pequeno pico logo ao amanhecer e um segundo mais pronunciado durante a tarde, às 15h. Interessante observar também o aumento substancial do poluente nos finais de semana, deflagrando uma ausência de relação direta com fluxo de veículos.

**FIGURA 66 - AUC - Oscilações Intra-anuais de  $O_3$**



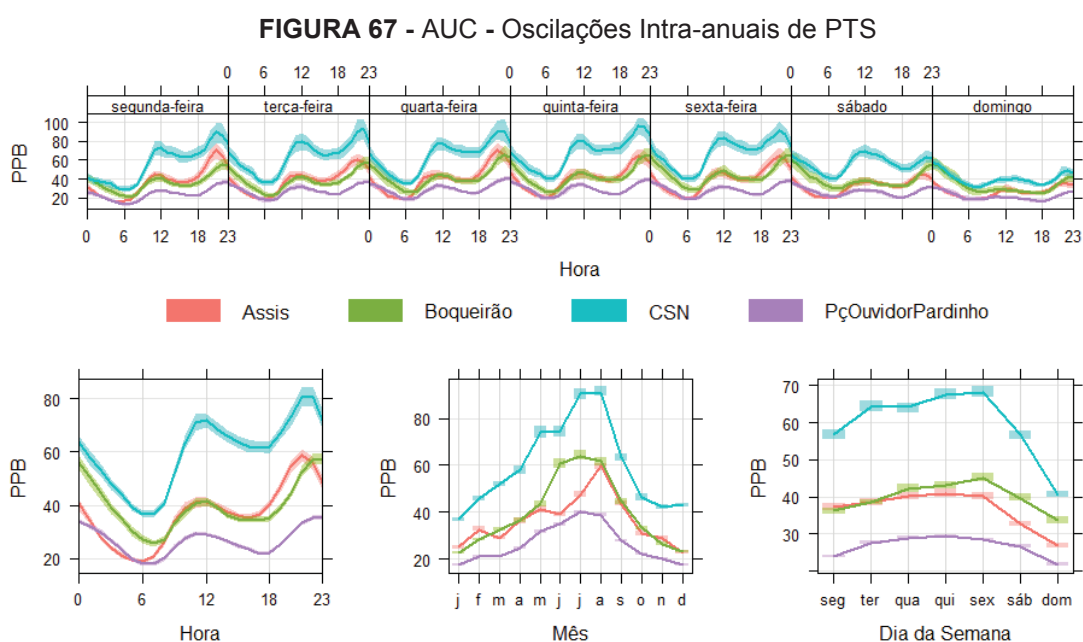
FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

No caso do PTS os pontos de valores mais altos foram na estação CSN e Boqueirão, cabendo a estação central da Praça Ouvivor Pardiniho os valores médios mais reduzidos (Figura 67).

Este poluente apresentou uma relação clara com fluxo de veículos na cidade e com o clima de Curitiba. Os meses de junho a agosto foram aqueles em que os valores se mantem mais altos, frutos principalmente da pouca chuva nesta época do ano.

Observou-se uma queda substancial nos níveis do PTS nos finais de semana, consequência de um menor volume de veículos trafegando na cidade de maneira geral.

Ao longo de um dia, o poluente apresenta dois picos, o primeiro as 10h e o segundo as 22h, ambos ocorrendo entre duas e três horas após o fim dos horários de maior tráfego de carros na cidade.



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

A seguir, serão apresentadas as técnicas utilizadas para o detalhamento dos níveis de poluição com cada variável meteorológica bem como os resultados obtidos.

### III.2 DIREÇÃO E VELOCIDADE DOS VENTOS

Para estabelecer uma relação entre os ventos (direção e velocidade) e os poluentes utilizou-se da proposta de Carslaw e Beevers (2013) denominada *Bivariate Polar Plots* (BPP). Tal técnica foi utilizada com sucesso em análises nas cidades de Poznan (CZERNECKI et. al., 2017) e Cracóvia (SZULECKA et. al., 2017) ambas na Polônia, com séries temporais menores do que a apresentada neste estudo.

A BPP se consiste em um método estatístico para detecção de fontes emissoras baseadas em um conjunto de dados horários de velocidade e direção dos ventos e concentração do poluente que se deseja avaliar.

Primeiramente se agrupam dados de velocidade e direção dos ventos. Para cada agrupamento será calculado uma média do poluente que se deseja analisar. Os valores obtidos então serão reagrupados através da técnica não hierárquica de K média ou *k-means*. Sobre este método, Wangenheim (2016) aponta os procedimentos para sua conclusão:

Padronize ou estandardize todos os dados, descrevendo cada variável em termos de distância de seu valor em desvios-padrão da sua média. Fixa-se o número de agrupamentos desejado =  $k$ ; divida os casos aleatoriamente nos  $k$  grupos; calcula-se o centroide de cada grupo; com os dados padronizados, calcula-se, para cada caso, a distância euclidiana em relação ao centroide de cada grupo; transfira o caso para o grupo cuja distância ao centroide é mínima. (WANGENHEIN, 2016, p.5)

Este agrupamento de dados é plotado em uma carta polar que indica velocidade e direção dos ventos e concentração média do poluente em escala de cores. Os dados de velocidade e direção dos ventos, utilizados para esta análise, foram coletados junto às próprias estações de qualidade do ar, possibilitando um resultado mais próximo à realidade.

Tal plotagem foi realizada através do pacote para R, *Openair*, desenvolvido por Carslaw e Ropkins (2012), pacote este desenvolvido exclusivamente para análise de series temporal de dados de poluição.

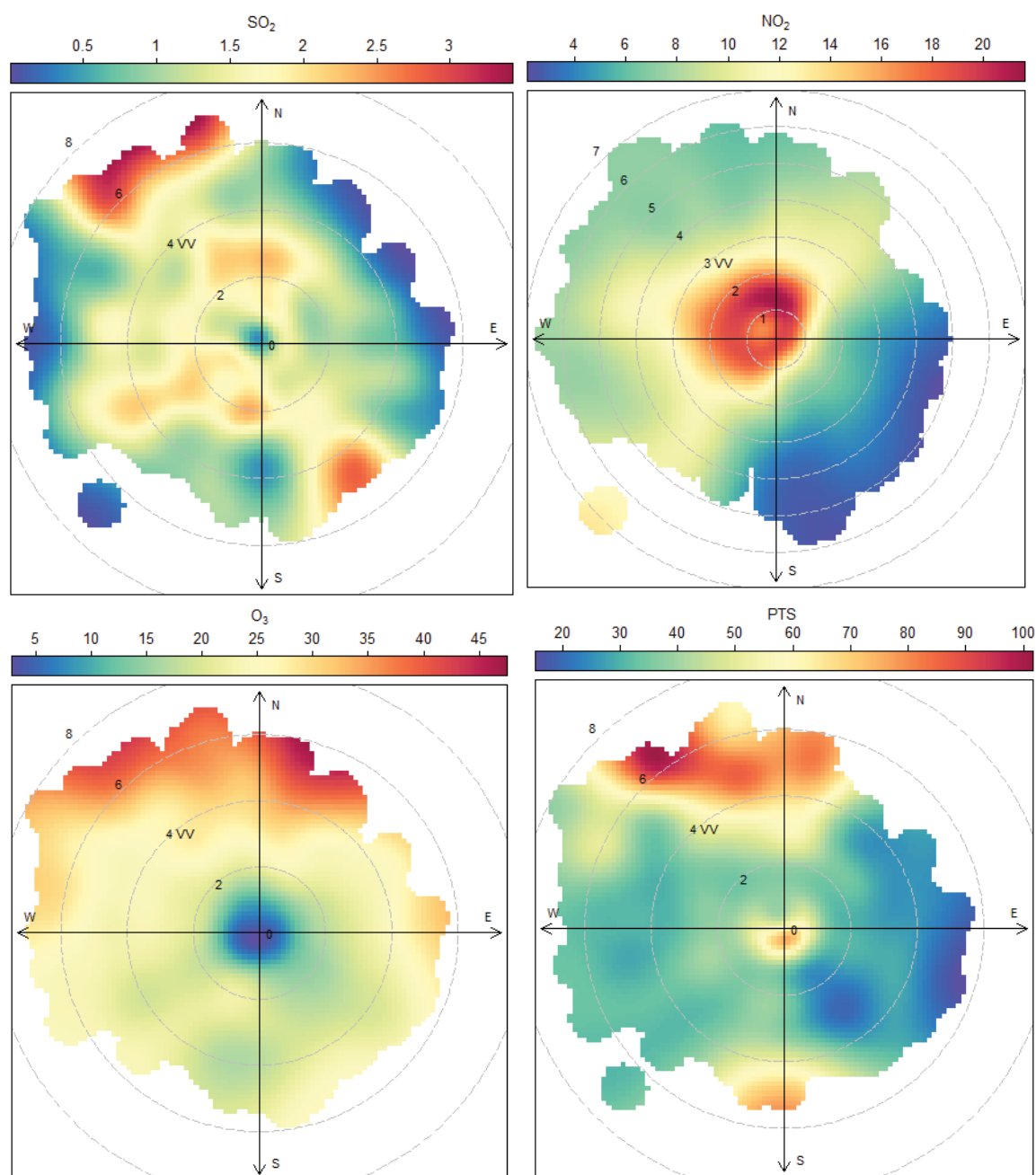
Em uma mesma plotagem apresenta-se direção do vento, velocidade demarcada pelos anéis e concentração de poluição, demonstrada pela escala de cores. O ponto de encontro dos eixos leste-oeste e norte-sul na plotagem polar seria o local onde se localiza a estação de coleta de dados.

Os dados condizentes a estação Boqueirão, apontados pela Figura 68, trazem os quadrantes Norte e Noroeste como as direções de onde provem a maior quantidade de gases. Os poluentes SO<sub>2</sub> e PTS ainda apontaram altas quantidades vindas do sentido Sul e Sudeste.

O poluente NO<sub>2</sub> foi o único que demonstrou altas concentrações com ventos em baixa velocidade, sendo que nos demais, ocorreu o oposto, com maiores concentrações sob ventos com velocidade entre 4m/s e 8m/s.

Observando a localização específica desta estação, observa-se a presença das vias Av. Marechal Floriano Peixoto e Linha Verde nos quadrantes Norte/Nordeste. Tais vias encontram-se a certa distância da estação coleta (2,6 km da Linha Verde e 1,1 km da Av. Mal. Floriano Peixoto), o que pode explicar a relação entre ventos mais fortes e a presença destes, visto que, a distância a ser percorrida entre a possível fonte e a estação é relativamente alta.

**FIGURA 68** - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Boqueirão. 2005-2014

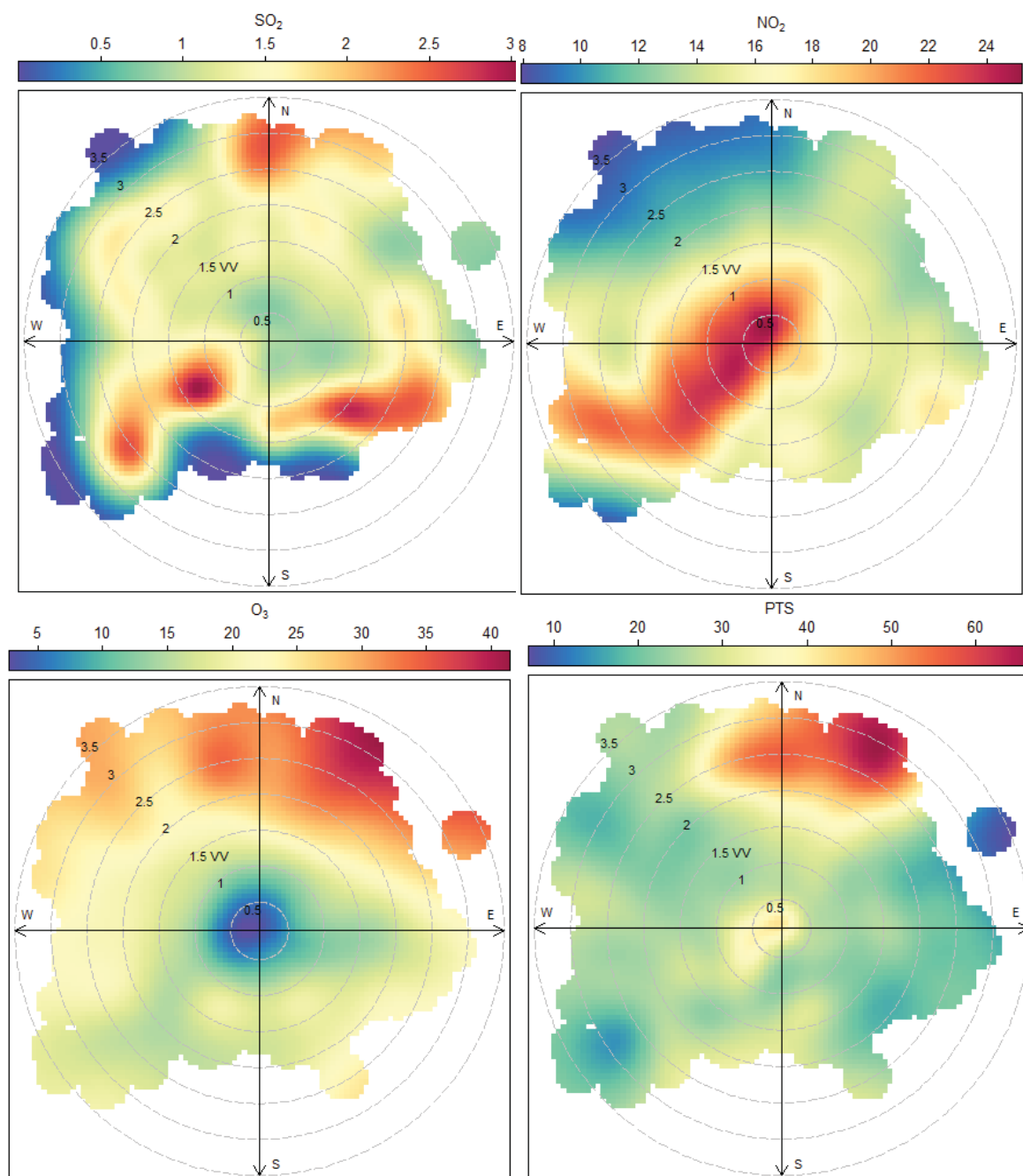


FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

A estação Praça Ouvidor Pardinho revelou padrões diferentes entre cada poluente. O dióxido de enxofre apresentou os valores mais altos com ventos dos quadrantes Norte, Sudoeste, Sul e Sudeste (Figura 69).

A plotagem revelou que, para este caso, observou-se uma dada relação inversa entre a velocidade dos ventos e a concentração de poluição, com valores menores de poluição com velocidades acima de 2,5 m/s ou 3 m/s a depender da direção.

**FIGURA 69** - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Praça Ouvidor Pardinho. 2005-2014.



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).



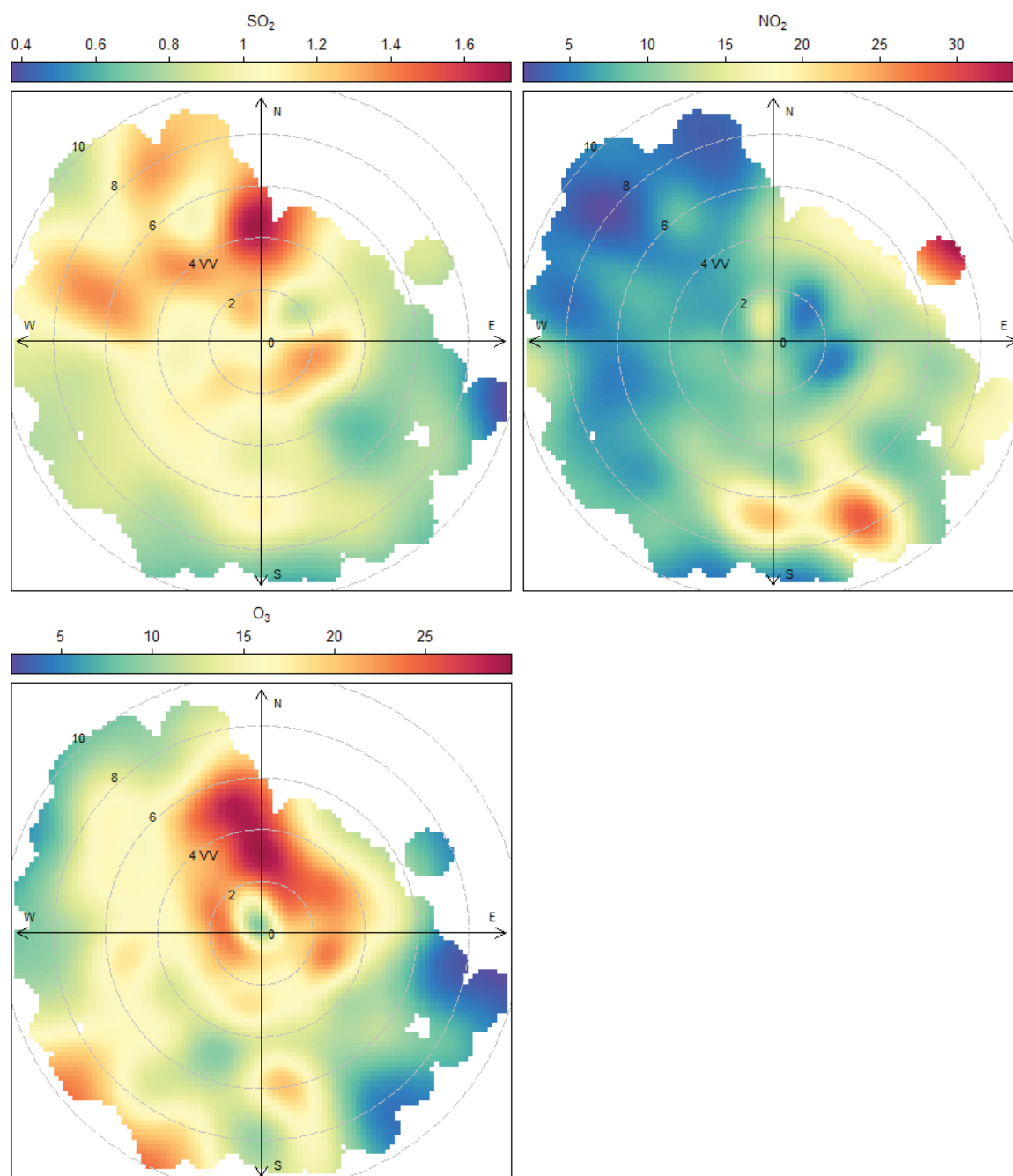
Para o Dióxido de Nitrogênio, as concentrações tiveram seus ápices com ventos no quadrante Sudoeste em sua maioria e também nos quadrantes, oeste, noroeste e norte. Neste caso, novamente, observou-se que, com ventos em velocidade abaixo de 0,5 m/s as concentrações eram altas independentes da direção de ventos dominante.

A estação Santa Cândida revelou padrões de direção e velocidade dos ventos semelhantes entre o  $O_3$  e o  $SO_2$ , com as maiores concentrações ocorrendo com ventos provenientes dos quadrantes Norte, Nordeste e Noroeste. No caso do  $NO_2$ , além do Nordeste, também foram registradas altas concentrações com ventos provenientes do Sul e Sudeste (Figura 70).

Em direções diferentes a estas citadas, observou-se uma relação inversa entre a velocidade dos ventos e a concentração de poluição atmosférica. O  $NO_2$  em direção Oeste, e o  $O_3$  e  $SO_2$  em direções Leste, exemplificam tal afirmação.

A Norte e a nordeste da estação estão alocadas as vias Rua João Máximo Klopp e Estrada da Uva, duas vias de alto movimento, e que podem explicar a origem destes poluentes.

**FIGURA 70 - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Santa Cândida. 2004-2015.**

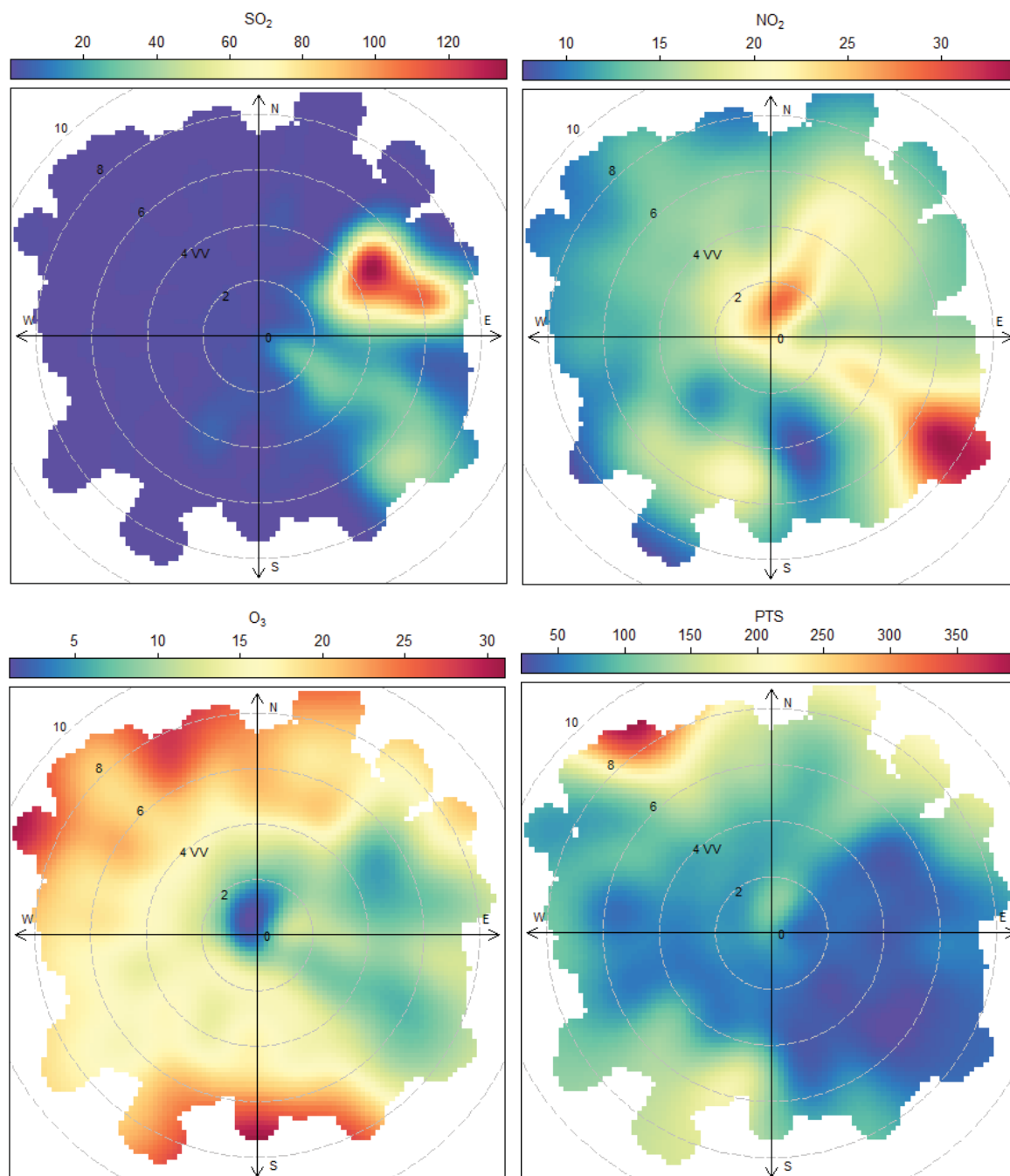


FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

Os resultados da relação entre  $\text{SO}_2$  e velocidade e direção dos ventos na estação CSN deflagrados pela figura 71 são os mais evidentes até aqui.

Observou-se uma mancha escura apenas no quadrante Leste/Nordeste, direção onde se encontra além da própria CSN, a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR). Ventos nas demais direções para este poluente tiveram registros muito baixos, quase imperceptíveis.

**Figura 71** - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação CSN. 2005-2014.



FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

No caso do  $\text{NO}_2$  a concentração maior está no quadrante Leste/Sudeste, com menores concentrações vindo de Nordeste. O gráfico apontou que, para este poluente, velocidades de vento acima de 8 m/s, portanto altas, deflagraram os maiores valores.

Em relação à velocidade dos ventos, o Material Particulado teve resultados próximos, apontando também que, as maiores concentrações são registradas com valores acima dos 7 m/s. no que tange à direção, constatou-se

que estas provêm do sentido oposto aos outros dois poluentes, vindo do quadrante Noroeste, região onde se encontra a Rodovia do Xisto.

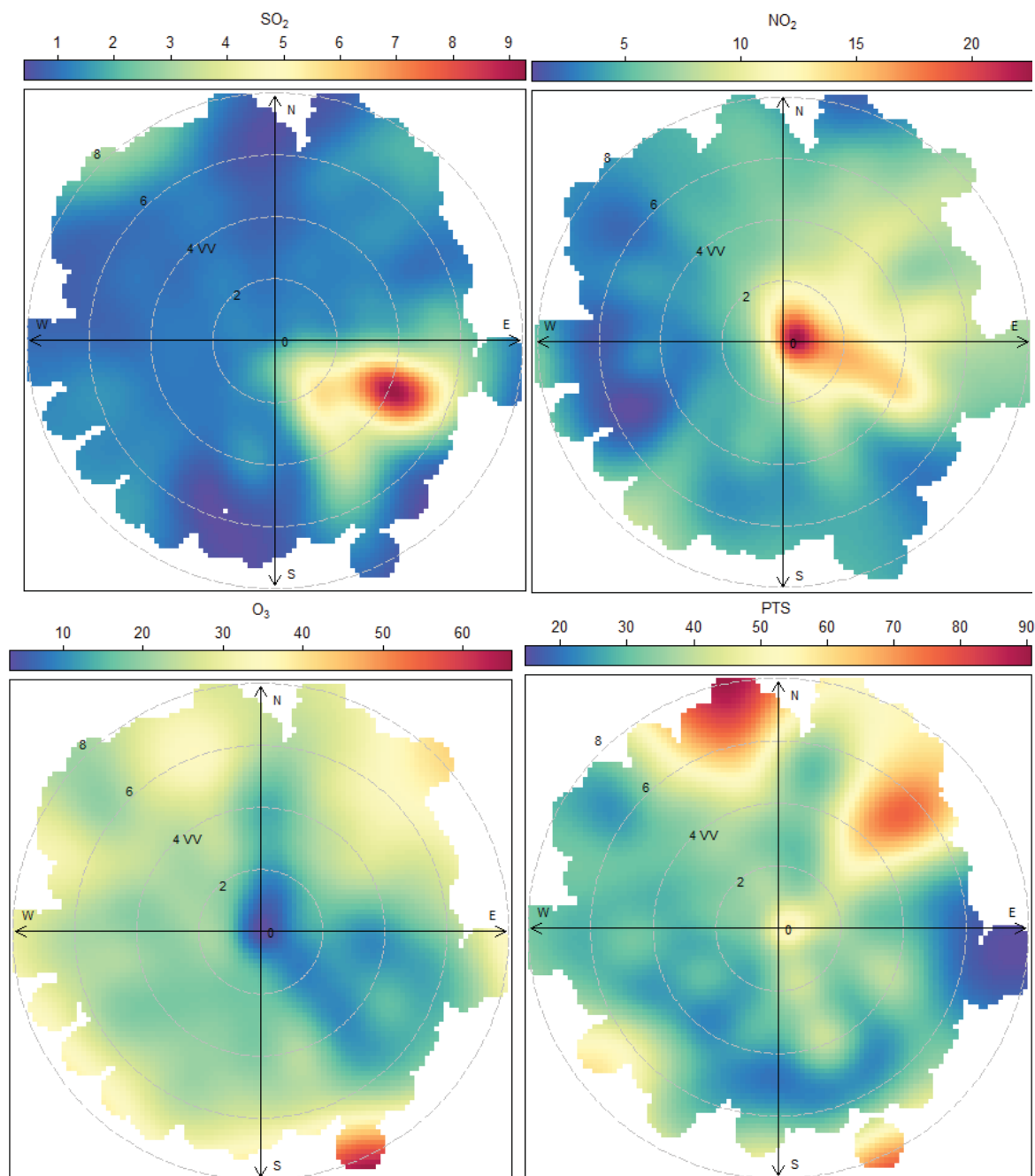
Por fim, o poluente com resultado mais obtuso para este estudo específico, o ozônio troposférico revelou altas concentrações sob altas velocidades (acima de 7 m/s), e baixas concentrações com ventos fracos.

As direções sob o qual o gás se manifestou com mais intensidade para esta estação foram Norte/Noroeste e Sul.

Os resultados obtidos junto à estação Assis corroboram com as ideias levantadas com os resultados da estação CSN (Figura 72). O caso do Dióxido de Enxofre registrou-se novamente de maneira clara a origem do poluente provindo do quadrante Leste/Sudeste, local onde está alocada o polo petroquímico do CIAR além da própria CSN e também da REPAR.

O NO<sub>2</sub> apresentou resultados próximos, indicando maiores concentrações com ventos e Leste e também sob baixas velocidades (abaixo de 2 m/s). O Ozônio, assim como na estação CSN, evidenciou resultados difusos. As concentrações maiores não estão condicionadas a nenhuma direção específica além de Sul/Sudeste. O que ficou claro neste poluente é baixas concentrações sob baixas velocidades do vento.

Em relação ao PTS, novamente observou-se um padrão já visto na estação CSN, de que as altas concentrações deste poluente não provem da região do polo petroquímico de Araucária, dado que, em sua maior parte, vem do quadrante Norte/Nordeste e Noroeste. Direções onde se encontram as vias de maior tráfego de veículos desta região.

**FIGURA 72** - AUC - Direção e Velocidade dos Ventos por Poluente - Estação Assis.2005-2014.

FONTE: IAP (2015). Org.: Castelhana (2019).

### III.3 PRECIPITAÇÃO

Para a análise referente à precipitação, o procedimento seguido foi de categorização dos tipos de chuva segundo proposta de Pinheiro (2016), e observação do comportamento dos poluentes para cada categoria.

A proposta de Pinheiro subdivide os tipos de chuva na região do AUC em cinco tipos de acordo com os valores registrados por dia. Assim têm-se chuvas ligeiras (0,1 a 2,5 mm), moderadas (entre 2,5 e 7,5 mm), intensa (7,5 e 15 mm),

muito intensa (entre 15,0 mm e o valor do percentil 95%) e por fim, as extremas (acima do percentil 95%), além disto, ainda foi proposta uma sexta categoria para os dias sem chuva.

Contudo, para observar com maior clareza a afinidade entre as categorias de chuva e os níveis de poluentes optou-se por trabalhar com oito categorias listadas na tabela 8.

A proposição de tais categorias se deu embasada por testes estatísticos e observações dos dados de poluentes mediante situações de chuva.

Foram gerados *boxplots* para cada poluente em cada estação de coleta, indicando a flutuação dos valores de poluição sob cada categoria de chuva, possibilitando uma análise concisa do comportamento de cada poluente em relação à precipitação junto ao *software* R.

**TABELA 8-** Categorias de Chuva Propostas.

<b>CATEGORIA</b>	<b>QUANTIDADE DE CHUVA DIÁRIA</b>
Seco	0 mm
Categoria 1	0,1 a 2,5 mm
Categoria 2	2,6 a 5 mm
Categoria 3	5,1 a 7,5 mm
Categoria 4	7,6 a 10 mm
Categoria 5	10,1 a 12,5 mm
Categoria 6	12,6 a 15 mm
Categoria 7	>15,1 mm

FONTE: Adaptado de Pinheiro (2016) Org.: Castelhana (2019).

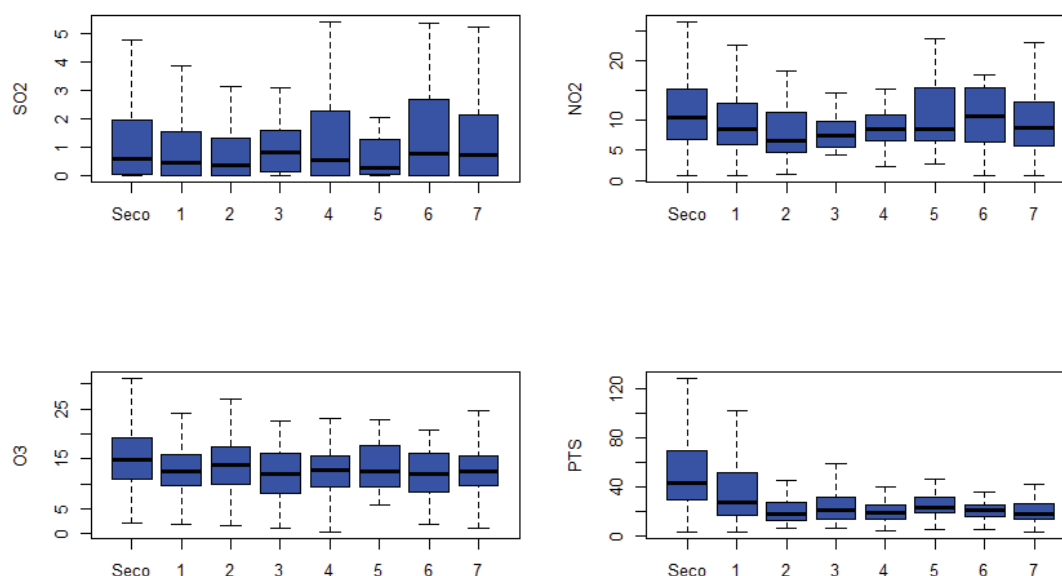
A categorização dos níveis de chuva por poluente e por estação revelou a real relação entre esta variável e a qualidade do ar. Os cálculos foram elaborados e plotados seguindo a lógica do subcapítulo anterior, diferindo os poluentes e as estações.

Na estação Boqueirão, a relação entre os níveis de chuva e a quantidade de poluentes na atmosfera ficou clara quando se observa os poluentes NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e PTS principalmente (Figura 73).

No caso do Dióxido de enxofre, tal fato se revelou de maneira muito difusa. Embora tenha sido observada uma diminuição nos níveis de poluição a partir da categoria 1, a mesma oscila muito, e tem nas categorias 4, 6 e 7 os seus valores mais altos. O valor máximo observado para este poluente em dias sem chuva foi de 4,7 ppb, em quanto que na categoria 4, chuva entre 7,6 e 10 mm, registrou-se valores acima de 5 ppb.



**FIGURA 73-** AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Boqueirão. 2005-2014



FONTES: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

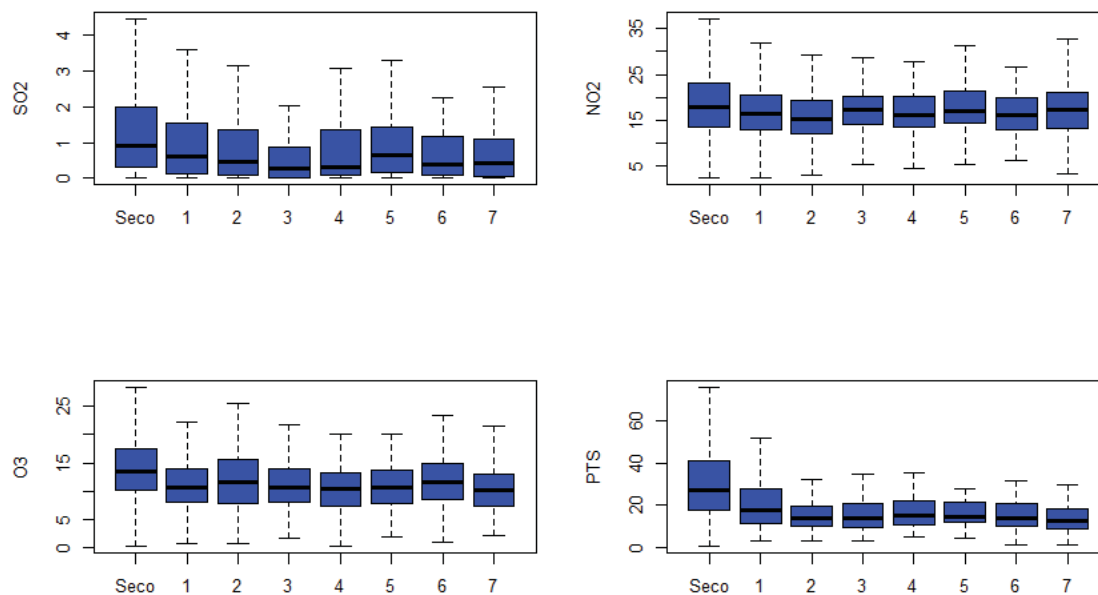
O Dióxido de Nitrogênio e Ozônio, apesar de oscilarem igualmente, tem seus valores maiores quando o tempo se apresenta sem chuvas, (26 ppb e 31 ppb respectivamente) tendo um declínio gradativo.

No caso do material particulado, a relação se mostrou com mais nitidez. Observa-se uma clara diferença entre os períodos sem chuva, e a categoria 1, a partir da categoria 2 observa-se uma manutenção dos valores, o que indica que, a partir de 2,5 mm de chuva, o poluente já apresenta altos níveis de dispersão.

Em dias secos, a mediana do poluente ficou pouco acima de  $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , já na categoria 1, observou-se uma queda para um valor próximo a  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e na categoria 2, já para menos de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor que se seguirá pelas demais categorias.

Os níveis de  $\text{SO}_2$  na estação Praça Ouvidor Pardini apresentaram uma queda relativa significativa quando se compara dias sem chuva com a primeira categoria, o valor máximo em dias secos foi de 4,2 ppb, enquanto que, sob a categoria 1, cai para 3,5 ppb. Nesta estação, todos os poluentes tiveram seus ápices em dias sem chuva (Figura 74).

**FIGURA 74 - AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Pç Ouvidor Pardinho. 2005-2014**



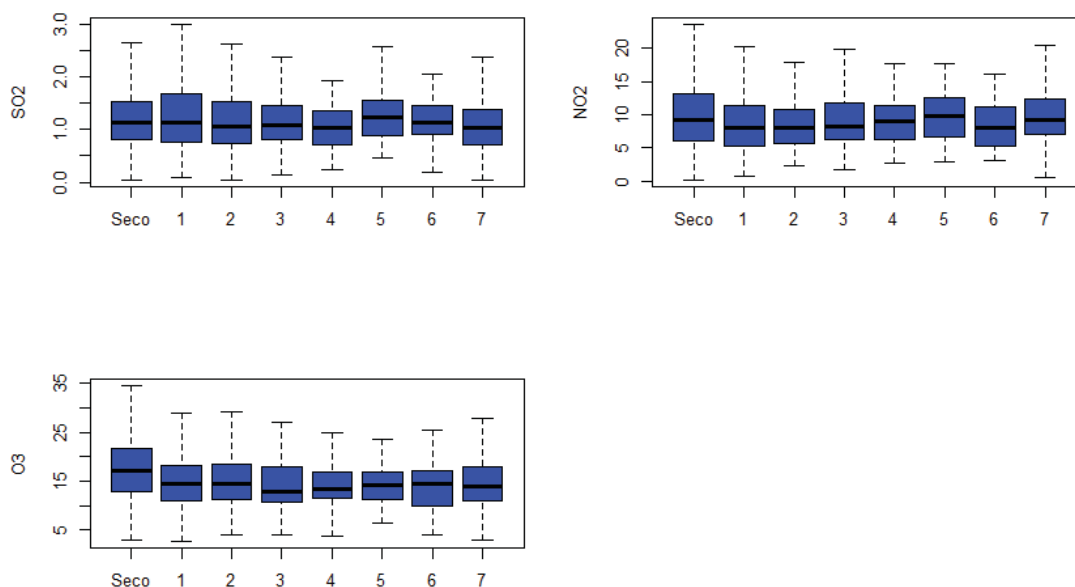
FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

Tanto o NO<sub>2</sub> quanto o O<sub>3</sub> tiveram resultados semelhantes, valores maiores em dias sem chuva (Picos de 36 ppb e 28 pbb respectivamente), e a partir da categoria de chuvas 1 uma certa constância.

Novamente observa-se no Material Particulado uma queda acentuada a partir da categoria 1, seguido por uma homogeneidade de valores a partir da categoria 2, indicando que, tanto as chuvas acima de 15 mm, quanto de 2,6 mm por exemplo, têm o mesmo poder de dispersão. O valor máximo deste poluente foi registrado quando da ausência de chuvas, chegando próximo a 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Já sob chuvas de até 2,5 mm o mesmo cai para próximo de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . O mesmo ocorre com a mediana, que, na primeira situação beira os 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e na seguinte decai para 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Na estação Santa Cândida, na região Norte de Curitiba, observa-se novamente uma desconexão entre os valores de SO<sub>2</sub> e as categorias de chuva, justificado pelo fato de os maiores valores do poluente terem sido registrados sob chuvas de 2,5 mm e pela oscilação heterogênea dos valores a medida que se modifica a categoria de chuva (Figura 75). O valor máximo do poluente (3 ppb) foi registrado sob a categoria de chuva 1, assim como a mediana (1,3 ppb).

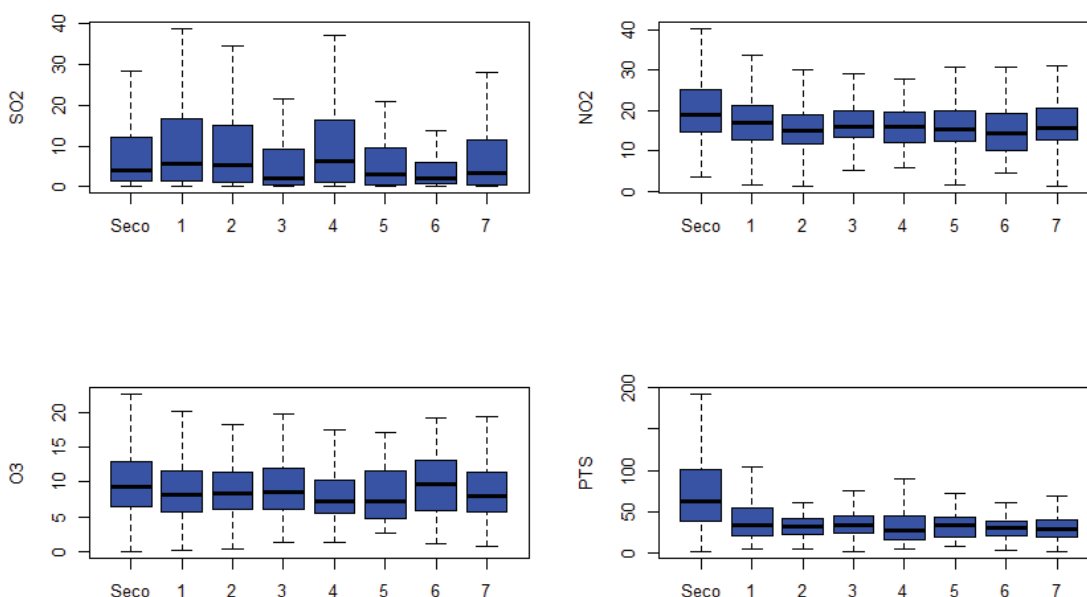
**FIGURA 75** - AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Santa Cândida. 2005-2014.



FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

O ozônio troposférico e o dióxido de nitrogênio por outro lado, mostraram resultados próximos ao esperado, quando se observa que, os dias secos novamente foram os com valores mais elevados e à medida que se avançam as categorias de chuva, os mesmos apresentaram quedas seguidas por estabilizações a níveis mais baixos.

Em Araucária, na estação próxima a zona industrial, CSN, a situação foi semelhante à observada nas demais estações (Figura 76). Assim, observa-se no dióxido de enxofre uma relação difusa, e talvez inexistente, dado que, novamente, seus maiores valores foram registrados durante períodos de chuva.

**FIGURA 76** - AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação CSN. 2005-2014.

FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

As categorias 1 e 4 foram os momentos em que o poluente atingiu seu ápice (39 e 37,5 ppb respectivamente). Uma diferença marcante aos 29 ppb registrados em dias sem chuva.

O NO<sub>2</sub> apresentou uma queda considerável entre o período seco e a categoria de chuva 1, tendo um limite superior de 40 ppb e caindo para 34 ppb, valor que assim se manteve com poucas alterações pelas demais categorias.

Comportamento semelhante a este foi observado para o O<sub>3</sub>, que após um limite superior de 24 ppb para dias secos, teve uma queda para 19 ppb e assim se manteve sem maiores diferenças entre as categorias seguintes.

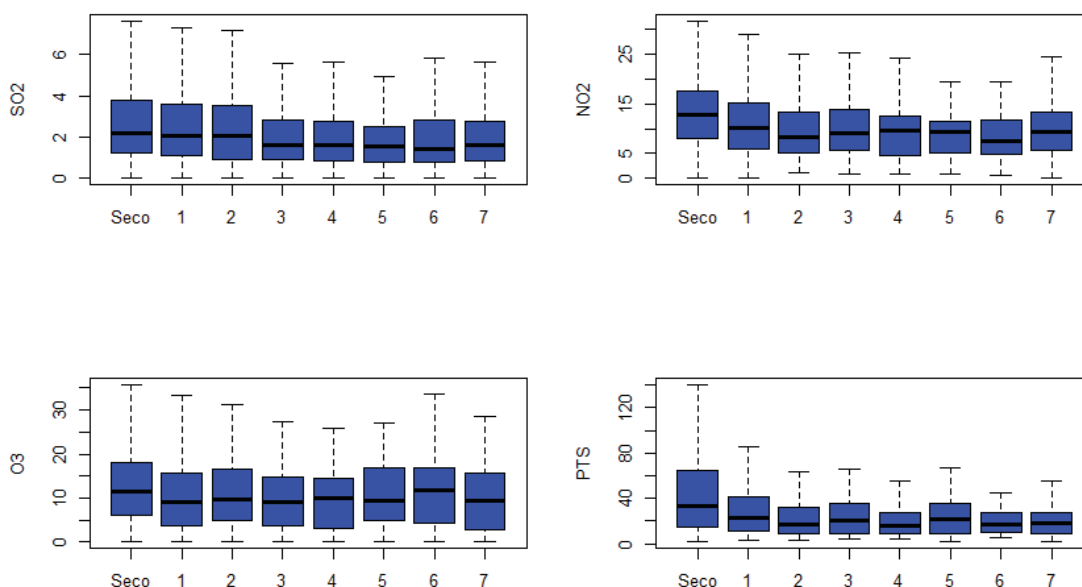
O material particulado, novamente foi o poluente que mais se dispersou com as chuvas, tendo um limite superior na casa dos 200 µg/m<sup>3</sup> para os dias secos, seguido por valores entorno de 100 µg/m<sup>3</sup> para chuvas de até 2,5 mm e a partir daí, beirando os 50 µg/m<sup>3</sup>.

A última estação deste estudo revelou padrões semelhantes aos já observados em todos os seus poluentes a exceção do SO<sub>2</sub> (Figura 77). Este gás apresentou quedas notáveis em sua concentração a partir da categoria de chuva 3 (5,1mm a 7,5mm), tanto nos limites superiores quanto na mediana, seguida por uma estabilidade.

O NO<sub>2</sub> também apresentou uma significativa queda entre os níveis 1 e 2, seguido também por uma estabilidade. Os valores em dias secos beiravam os

30 ppb como limite superior e 14 ppb como mediana, já na categoria 1, o limite superior caiu para 27 ppb e a mediana para 10 ppb. Na categoria seguinte, o limite superior já se encontra abaixo dos 25 ppb e a mediana a 8 ppb.

**FIGURA 77**– AUC - Registros de Poluição por Categoria de Chuva - Estação Assis. 2005-2014.



FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

O poluente com comportamento mais uniforme em relação aos níveis de chuva, nesta estação foi o O<sub>3</sub>, que, apesar de apresentar quedas entre as categorias 2 e 3, apresentou valores altos também nas categorias 6 e 7. Contudo, os dias secos e a categoria 1 ainda foram os períodos com os piores índices de qualidade do ar.

Finalizando esta análise, o PTS novamente se mostrou como o poluente que mais sofre influência do regime de chuvas, os limites superiores apresentaram quedas significativas entre os dias secos, e nas categorias 1 para 2, saindo de 140 µg/m³ para 60 µg/m³ e em seguida 50 µg/m³.

#### III.4 TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Para se analisar a relação entre os níveis de poluição, a temperatura e umidade relativa do ar, optou-se pela criação e análise de gráficos de dispersão envolvendo as variáveis supracitadas em escala horária, através do *software* R com o auxílio do pacote de dados *car* (FOX E WEISBERG, 2011) desenvolvido para auxiliar plotagens de séries e modelos temporais.

Em conjunto a tais gráficos foram geradas linhas suavizadas unidimensionais, apontadas por Lima (2001) como uma ferramenta estatística

capaz de descrever a tendência de uma dada variável Y em função de apenas uma variável X, sendo esta uma ferramenta de grande valia para o estudo da dependência de duas variáveis.

O método suavizador utilizado foi o Modelo Aditivo Generalizado ou MAG, explicado por Conceição et. al., (2001) como:

[...] uma extensão do modelo linear generalizado (MLG) [...]denotando uma função não paramétrica estimada através de curvas de alisamento. [...] não é necessário assumir uma relação linear entre  $g(\mu_i)$  e as variáveis explicativas, como no MLG. De fato, não é necessário nem mesmo conhecer previamente a forma dessa relação, mas é possível estimá-la a partir de um conjunto de dados. Essa função estimada ( $\hat{f}_j(x_{ij})$ ), também chamada de curva alisada, em muitas situações, nada mais é do que algum tipo de média dos valores  $Y_i$  na vizinhança de um dado valor  $x_i$ . A curva alisada permite então descrever a forma, e mesmo revelar possíveis não linearidades nas relações estudadas, uma vez que não apresenta a estrutura rígida de uma função paramétrica. (CONCEIÇÃO ET. AL., , 2001, P. 209).

A utilização de um modelo aditivo generalizado na análise de correlações como as aqui propostas substitui a necessidade de coeficiente linear e é particularmente interessante pois retrata detalhadamente a complexa relação não-linear entre as variáveis aqui apresentadas (PEARCE et. al., 2011).

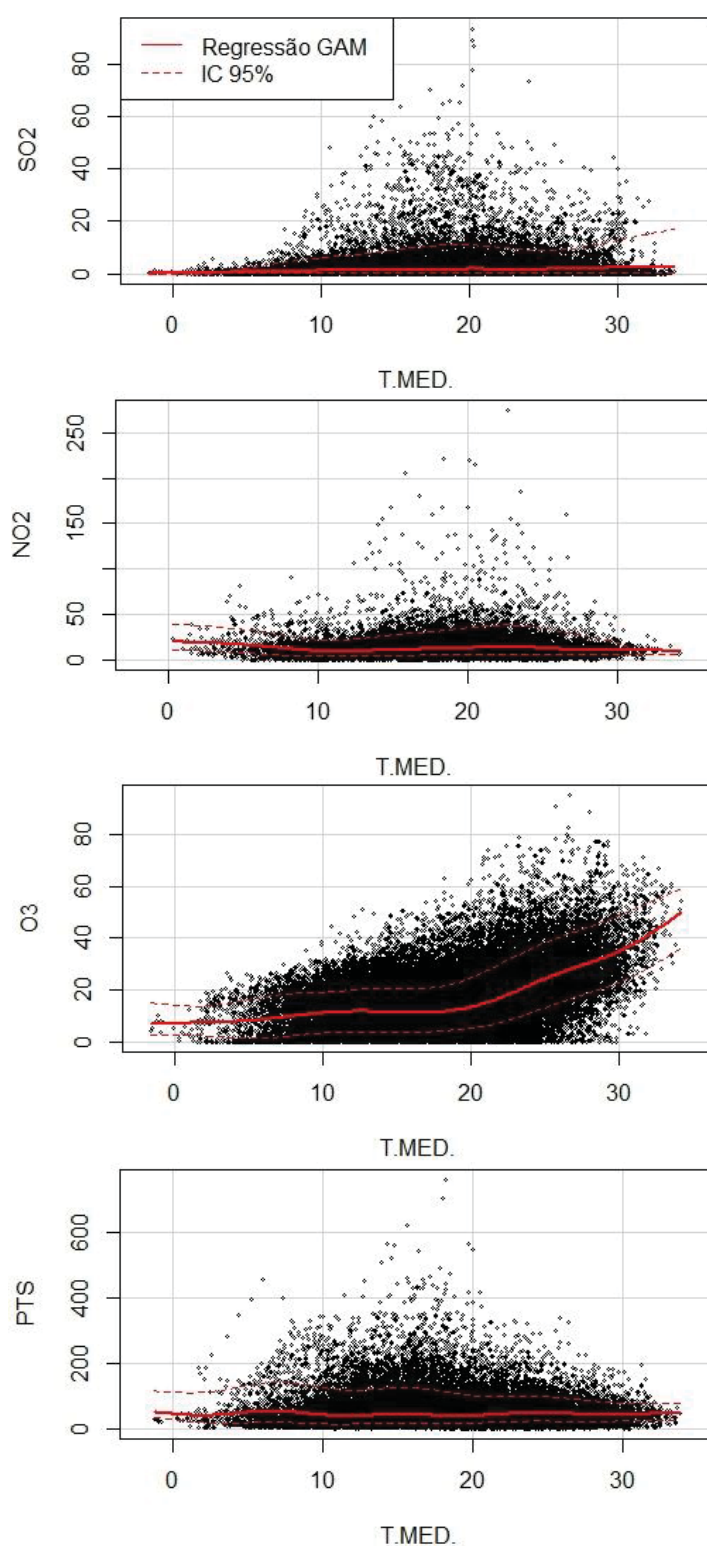
Tal técnica estatística já foi muito utilizada para estudos envolvendo poluição atmosférica como visto em Dominici et. al., (2002), Lima (2001), Tobias e Saez (2004), Peng et. al.(2006) e mais recentemente e com mais detalhes por Belusic et. al., (2015).

#### III.4.1 Temperatura

Os gráficos de dispersão relacionando os níveis de poluição com a oscilação dos valores de temperatura média revelaram situações distintas para cada poluente.

Na estação Boqueirão, representado pela figura 78, observa-se para o poluente SO<sub>2</sub> uma correlação praticamente nula. Embora fique claro que com temperaturas até 10°C o poluente não teve registros altos, a partir de então a relação já não se mostrou com tanta clareza.



**FIGURA 78** - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação Boqueirão. 2005-2014

FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

As linhas de regressão apontaram um leve aumento nos níveis deste poluente até um valor próximo 20° c, a partir de quando se observa uma constante queda concomitante ao aumento de temperatura.

Semelhante oscilação é observada na relação  $\text{NO}_2$  vs Temperatura. Os maiores registros do poluente encontraram-se na maioria no intervalo entre  $12^\circ\text{C}$  e  $26^\circ\text{C}$ , a partir de quando começam a serem registrados valores já mais baixos.

Resultado diferente foi observado com o poluente ozônio. Ressalta-se que, com temperaturas até  $18^\circ\text{C}$  o poluente apresenta poucas oscilações mantendo-se a níveis baixos, contudo, a partir de tal valor de temperatura, veem-se os níveis de ozônio subirem em conjunto com a temperatura em uma relação quase linear. Próximos aos  $30^\circ\text{C}$  já quase não foram registrados valores baixos de  $\text{O}_3$ .

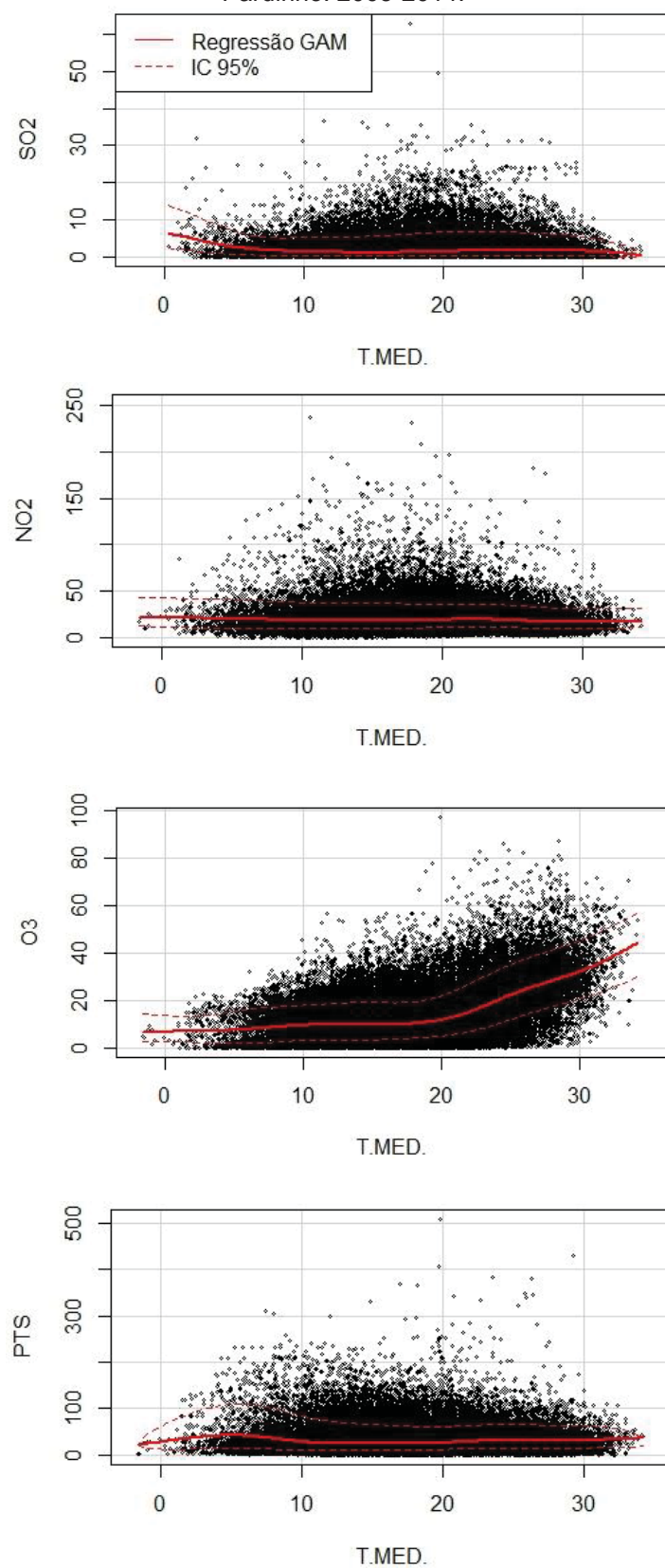
Os níveis de material particulado, por outro lado, demonstraram uma queda nos valores a partir de temperaturas com  $20^\circ\text{C}$ . Os maiores registros ocorreram no intervalo entre  $15^\circ\text{C}$  e  $20^\circ\text{C}$ , contudo, com temperaturas abaixo de  $10^\circ\text{C}$  ainda foi possível observar altos valores para este poluente nesta estação.

Para a estação Praça Ouvidor Pardinho os resultados foram ligeiramente diferentes conforme Figura 79. Para o  $\text{SO}_2$ , os registros do poluente mantiveram-se relativamente uniformes ante os valores de temperatura, observou-se uma pequena oscilação positiva próximo aos  $20^\circ\text{C}$  e ao  $0^\circ\text{C}$  e uma oscilação negativa à medida que se passa dos  $30^\circ\text{C}$  contudo todas estas bem suaves.

O  $\text{NO}_2$  igualmente mostrou-se com oscilações bem suaves, em geral apontando uma leve correlação negativa entre os níveis de poluição e a temperatura do ar.

O ozônio teve um resultado muito próximo do visto na estação anterior, com uma constância de valores de poluição até um valor próximo a  $18^\circ\text{C}$  a partir de quando o mesmo passa a subir em conjunto com a temperatura com leves oscilações.

**FIGURA 79** - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação Praça Ouvidor Pardinho. 2005-2014.

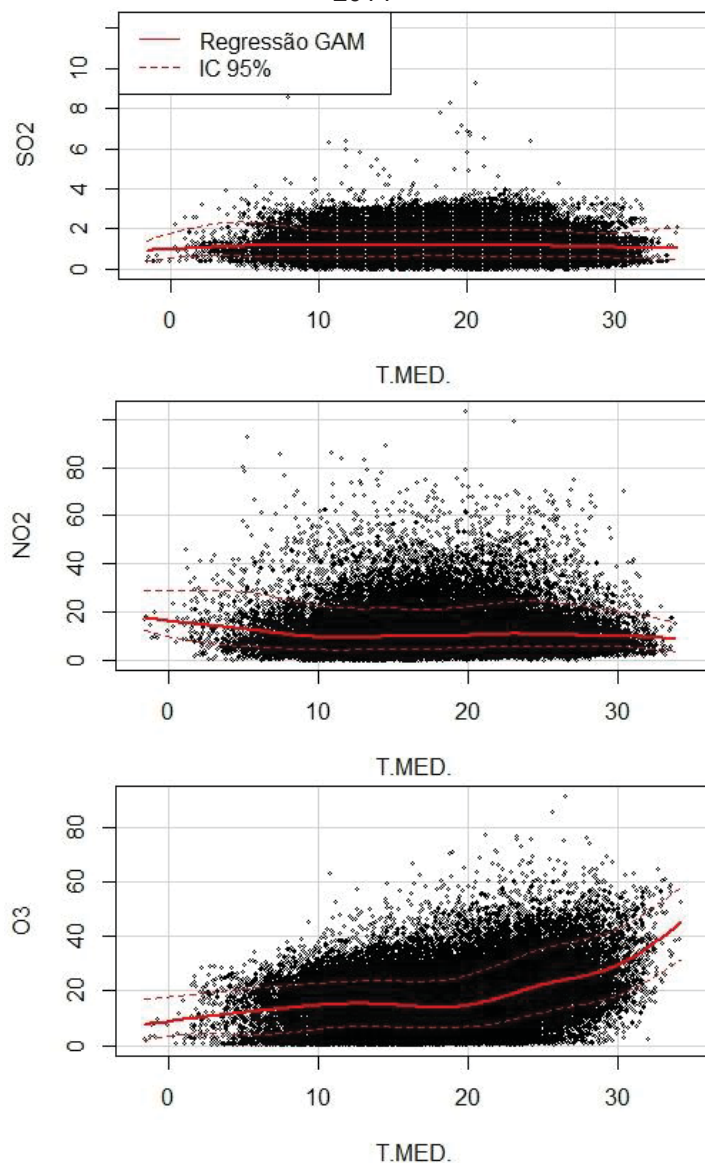


FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

As linhas de regressão apontaram para o PTS um leve aumento na concentração do poluente para o intervalo entre 2° C e 10° C, contudo os maiores valores registrados para este poluente nesta estação se deram no intervalo de 18°C a 22°C semelhantes ao observado na estação anterior.

A estação Santa Cândida, em Curitiba, tem suas relações entre os poluentes e a temperatura representadas na figura 80.

**FIGURA 80** - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação Santa Cândida.2005-2014



FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

Os níveis de SO<sub>2</sub> se mostraram uniformemente distribuídos entre os valores de temperatura, a exceção de poucos momentos, o que implica em uma ausência de relação entre o poluente e a temperatura para esta estação.

O caso do  $\text{NO}_2$ , a linha de regressão indicou uma maior concentração do poluente a temperaturas abaixo de  $10^\circ\text{C}$ , a partir do qual, observou-se uma linearidade equilibrada, o que nos indica a ausência de relação a partir deste ponto. O ozônio novamente apresentou a relação mais clara. Observou-se uma curva ascendente a partir dos  $20^\circ\text{C}$ , o que indica uma relação entre aumento de temperatura e aumento na concentração do poluente a partir deste valor.

Para a estação CSN, os valores observados seguiram semelhante lógica, deflagrados pela figura 81.

O dióxido de enxofre apresentou um leve aumento nos registros de poluição no intervalo de  $10^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ , para temperaturas inferiores e superiores, observaram-se níveis de  $\text{SO}_2$  ligeiramente menores.

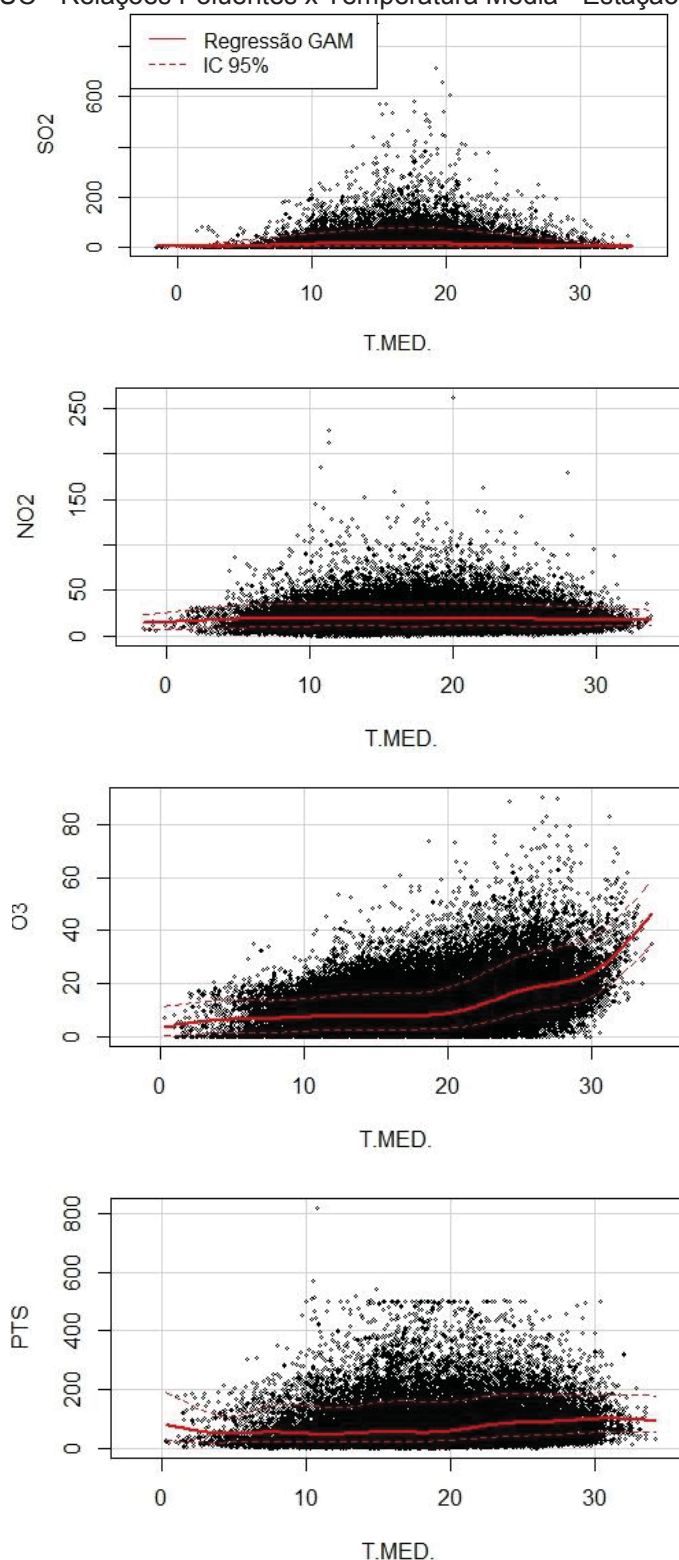
O  $\text{NO}_2$  por outro lado, comportou-se de maneira semelhante independente das temperaturas observadas, tal fato se constata pela linearidade da regressão GAM observada.

Diferentemente deste, o ozônio novamente mostrou uma relação clara com o aumento de temperatura, observa-se com clareza um aumento nos níveis deste poluente a partir de temperaturas na faixa dos  $20^\circ\text{C}$  e que tendem a se aumentar à medida que se aumenta a temperatura.

Ainda observando a estação CSN, nota-se uma ligeira irregularidade nos valores de PTS quando relacionados à temperatura, o que pode indicar ausência de relação.

A linha de regressão plotada indica uma dada linearidade com pequenos desvios positivos e negativos ao longo da série, não deixando clara como se dá a relação entre este poluente e esta variável climática.

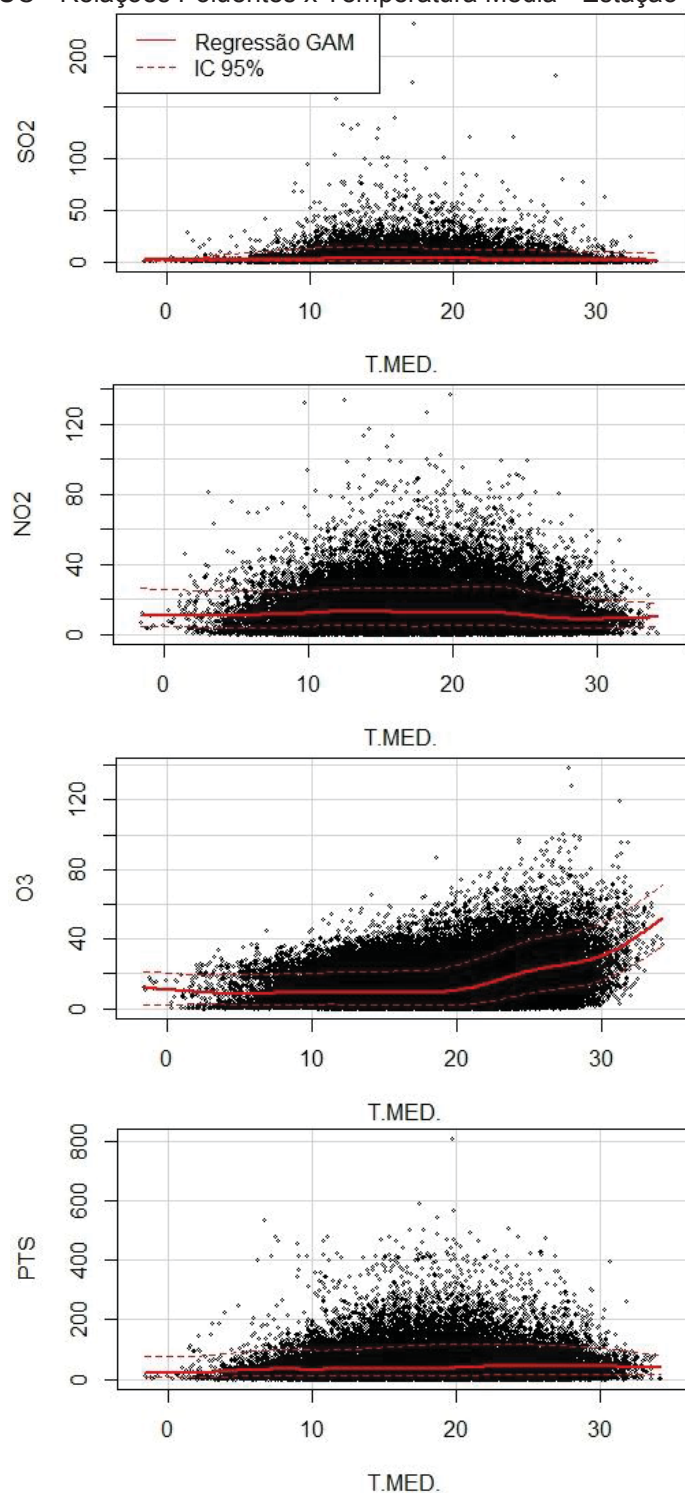
Na última estação, Assis, os dados apontados pela figura 82 deflagram nova ausência de relação entre os valores de temperatura e os poluentes  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_2$  e PTS, descritos como uma linha pela regressão GAM.

**FIGURA 81 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação CSN.2005-2014.**

FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

O ozônio novamente se destacou como aquele com relação mais clara. Observou-se um crescente nos níveis de  $O_3$  com temperaturas a partir de  $20^{\circ}C$ , semelhante ao observado nas demais estações. O nível do poluente se acentua ainda mais quando se passa a observar temperaturas acima dos  $30^{\circ}C$ .



**FIGURA 82 - AUC - Relações Poluentes x Temperatura Média - Estação CSN. 2005-2015.**

FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

### III.4.2 Umidade Relativa do Ar

Os gráficos de dispersão analisados a seguir revelam o nível de relação existente entre a variação de umidade relativa do ar coletado junto à estação meteorológica do SIMEPAR e os valores absolutos de poluição coletados em cada estação.

Os resultados se configuraram de maneira distinta para cada poluente em cada estação. No ponto localizado no bairro Boqueirão, deflagrado pela figura 84 observou-se uma distribuição de valores de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_2$  quase homogênea entre os diferentes valores de umidade, o que configura uma quase ausência de relação entre estes poluentes e esta variável climática.

O mesmo não pode se dizer dos níveis de ozônio troposférico, que, neste sitio, apresentaram clara queda em seus níveis à medida que o percentual de umidade relativa se eleva a partir dos 30%.

De maneira relativamente mais sutil, o mesmo se observou em relação ao PTS, uma leve queda nos valores coletados à medida que se eleva os níveis de umidade relativa do ar.

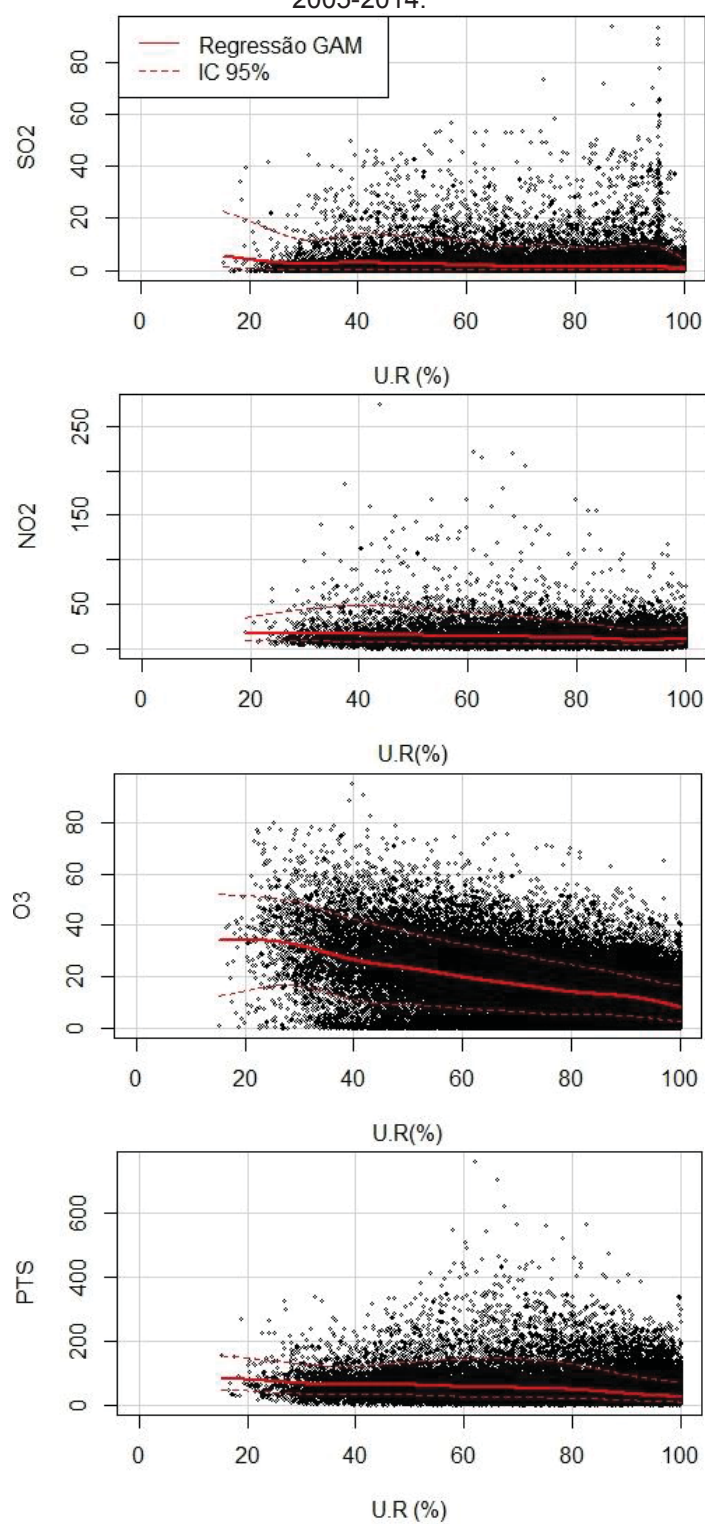
A estação alocada na região central de Curitiba evidenciou considerações semelhantes às vistas no sitio anterior (Figura 84). O dióxido de enxofre manteve-se com quase ausência de relação com os valores de umidade relativa do ar. Observa-se uma leve inclinação descendente na linha de regressão a partir de valores de 70% na umidade, o que sugere uma diminuição nos níveis de poluição a partir de tal valor.

Tanto Dióxido de Nitrogênio quanto material particulado (PTS) apresentaram também uma leve relação inversa com os níveis de umidade no ar. Ambos de maneira linear sendo que o primeiro se revelou de maneira um pouco mais acentuada que o segundo.

Novamente o ozônio troposférico foi aquele com relação mais clara e semelhante ao observado na estação Boqueirão. Os maiores valores registrados deste poluente se encontram em situações de baixa umidade relativa do ar, principalmente com níveis entre 25% e 35%.

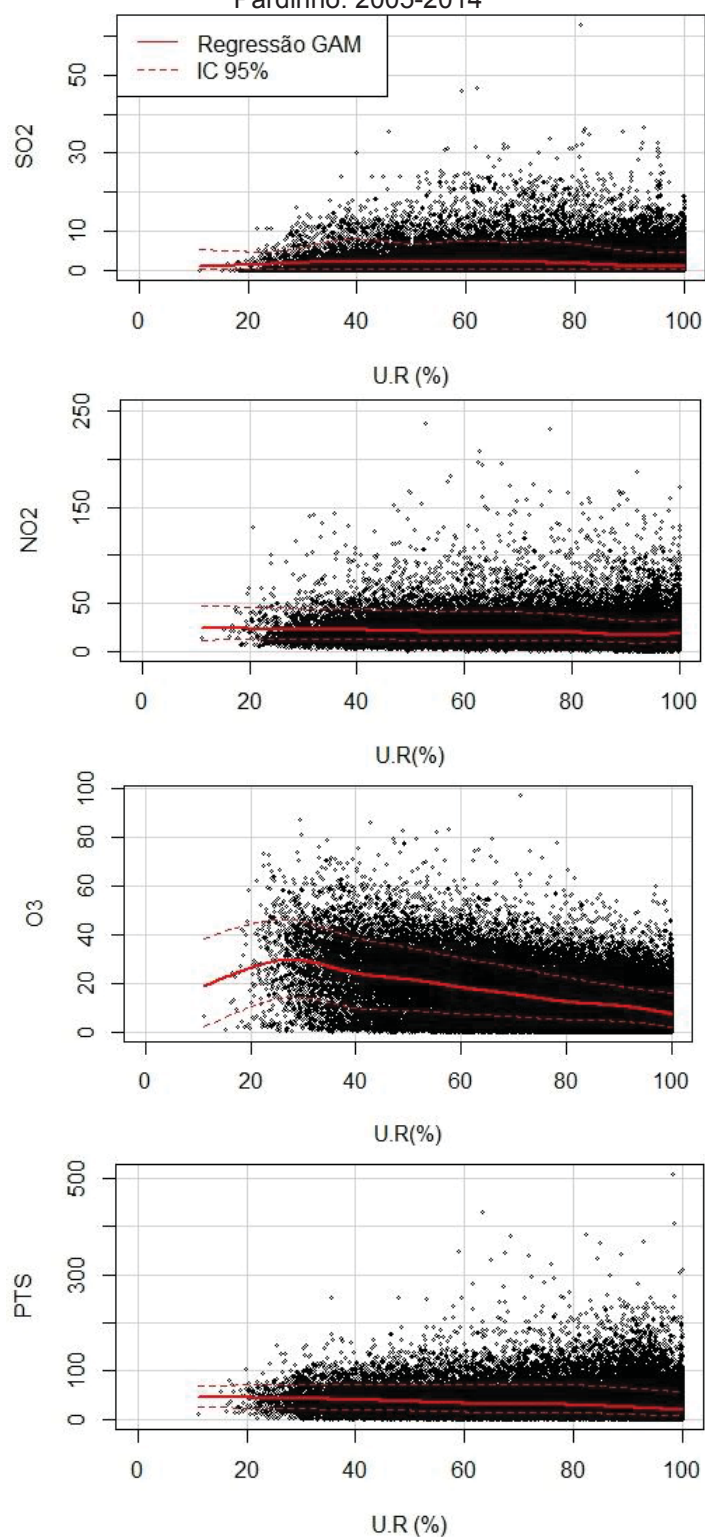
A partir de então se observa que, os registros de  $\text{O}_3$  passam a decair linearmente à medida que se aumentam os níveis de umidade.

**FIGURA 83 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Boqueirão. 2005-2014.**



FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

**FIGURA 84 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Praça Ouvidor Pardinho. 2005-2014**

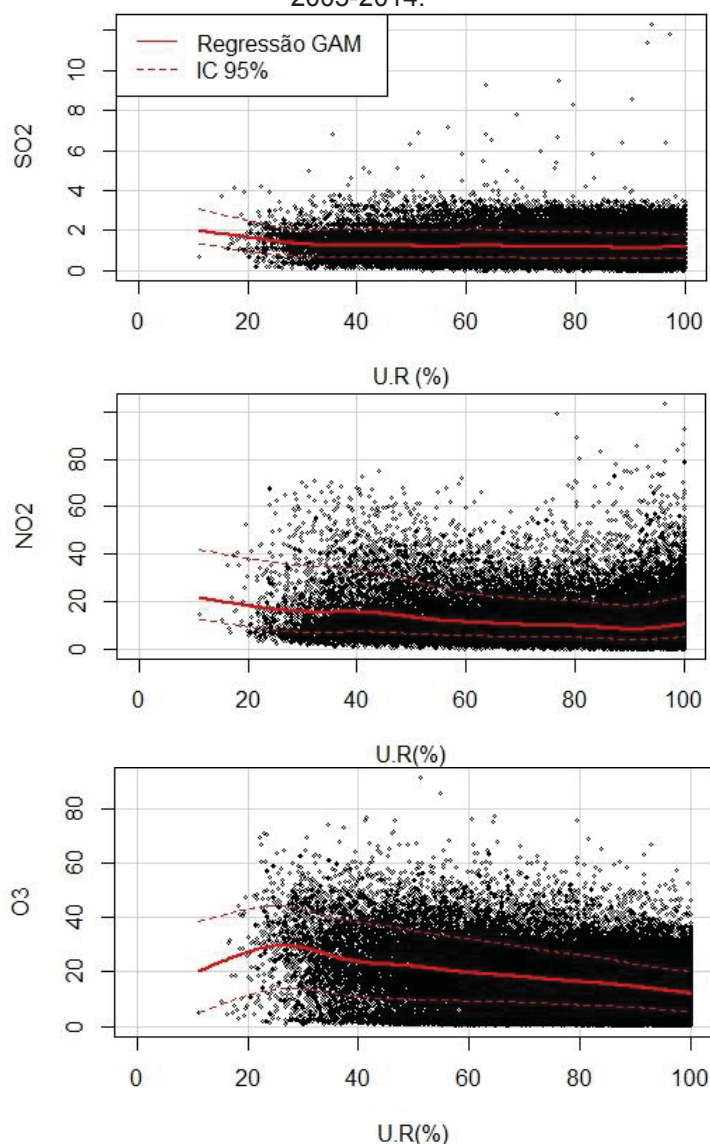


FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

Os dados coletados pela estação Santa Cândida (Figura 85) são novamente semelhantes. Observa-se uma quase ausência de relação entre umidade relativa do ar e SO<sub>2</sub>, assim como uma clara relação inversa entre esta e o O<sub>3</sub> a partir da faixa de 30% de umidade relativa do ar.

Chama a atenção os valores obtidos pela relação  $\text{NO}_2$  vs Umidade do Ar, uma vez que, diferente das demais, neste caso a mesma está mais evidente, demonstrando uma relação linear inversa com maior força quando comparada as estações anteriores.

**FIGURA 85** - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Santa Cândida. 2005-2014.

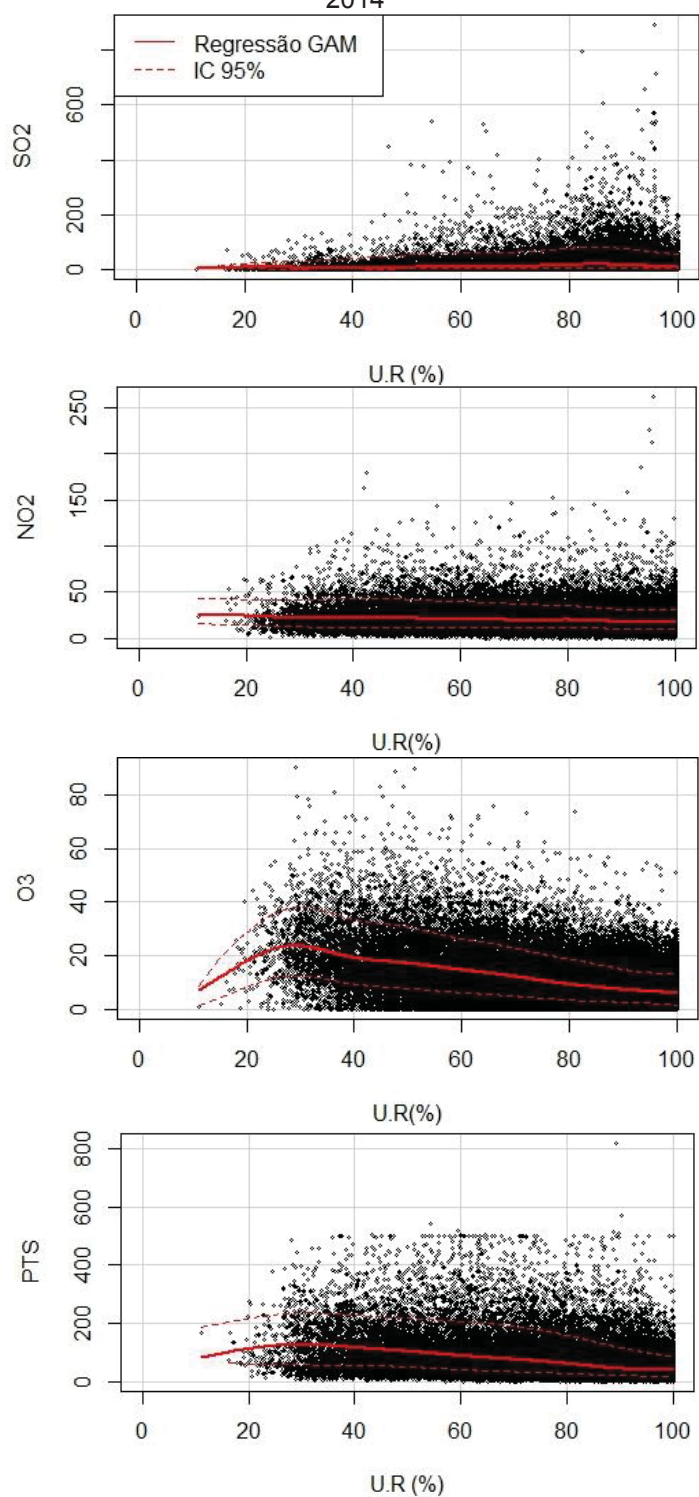


FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

Em Araucária, a figura 86 aponta os gráficos de dispersão para os dados de poluição coletados junto à estação CSN.



**FIGURA 86 - AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação CSN. 2005-2014**



FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

Relacionando Dióxido de enxofre com os níveis de umidade relativa do ar, observou-se pela primeira vez uma relação positiva sutil. Passando para o Dióxido de Nitrogênio, observou-se de maneira mais clara uma relação inversa



demonstrada pela linha de regressão e que sugere valores menores do poluente em situações de maior umidade relativa do ar.

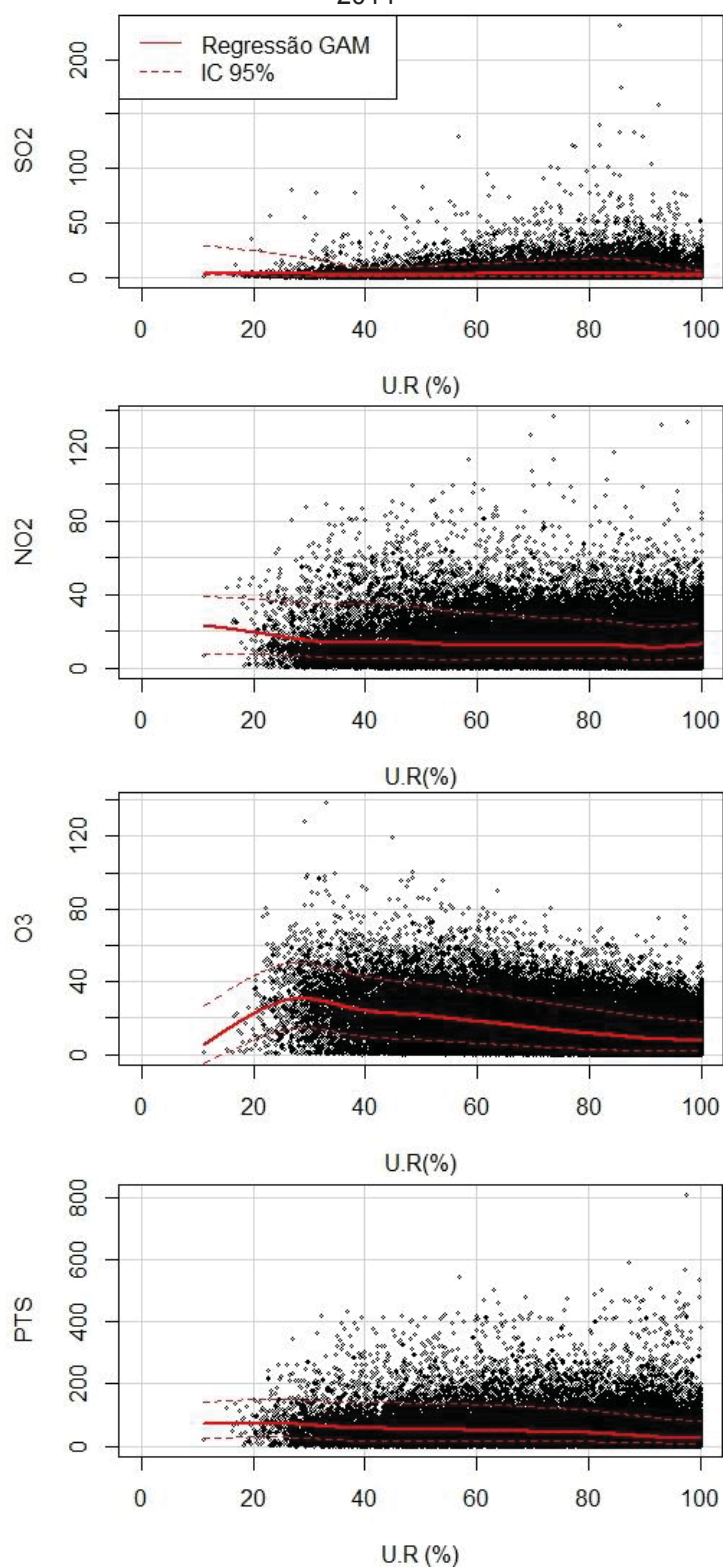
Os poluentes  $O_3$  e PTS tiveram dinâmicas semelhantes neste ponto, deflagrando uma relação inversa. O material particulado chamou a atenção por ter se diferenciado das demais estações vistas aqui, exibindo uma linha de regressão com sentido e direção mais clara do que as demais.

Na estação Assis também em Araucária o  $SO_2$  novamente revelou pouca relação com os níveis de umidade, tendo seus valores bem distribuídos pela curva de valores da variável climática (Figura 87).

O Dióxido de Nitrogênio e PTS revelaram leve relação inversa com suas curvas de regressão tendo uma sutil inclinação neste sentido, sugerindo novamente que os maiores valores de poluição tendem a ocorrer com baixa umidade do ar.

A relação entre ozônio e umidade relativa do ar novamente foi a mais clara. Percebe-se que a partir de valores de 25% de umidade os níveis do poluente passam a cair gradativamente à medida que o primeiro aumenta, sendo que a faixa entre 20% e 35% de umidade se configura como aquela com maior concentração de  $O_3$ .

**FIGURA 87- AUC - Relações Poluentes x Umidade Relativa do Ar - Estação Assis. 2005-2014**



FONTE: IAP (2015) e INMET (2015). Org.: Castelhana (2019).

### III.5 ANÁLISE RÍTMICA

A análise rítmica, dos tipos de tempo atuantes, foi realizada com base em dados meteorológicos diários e comparados com dados de poluição na mesma

escala. Os quatro meses selecionados representaram períodos em que cada poluente apresentou registros acima dos considerados ideais.

### III.5.1 Outubro de 2010

As análises previamente realizadas apontaram o mês de outubro de 2010 como um momento em que o ozônio troposférico apresentou altos valores em todas as cinco estações analisadas, o que embasou a escolha de tal mês para a realização da análise rítmica de seus tipos de tempo.

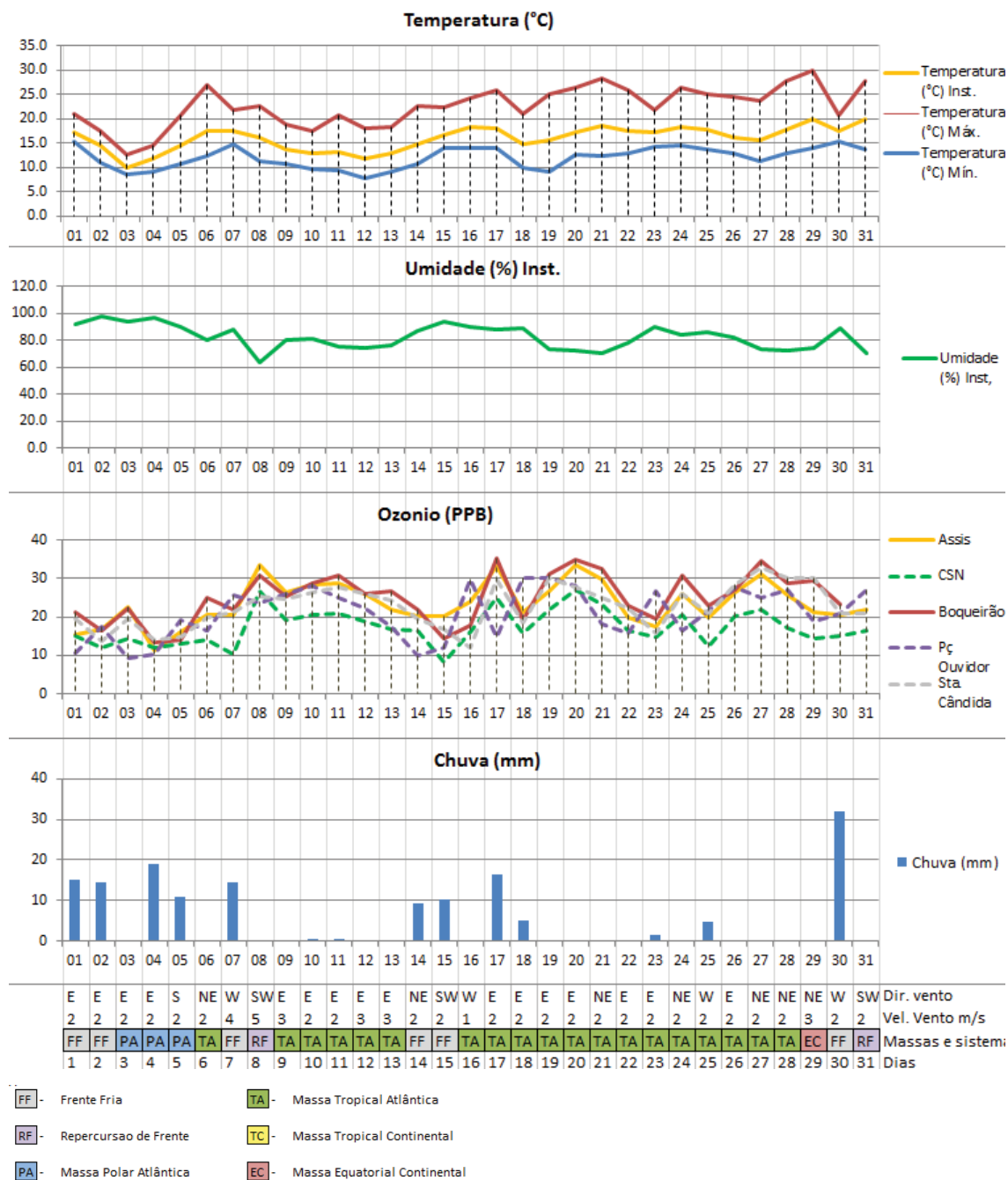
O poluente aqui analisado apresentou uma oscilação semelhante em todos os pontos de coleta, com um valor máximo de 35,2 PPB na estação Boqueirão no dia 17/10/2010 e mínimo de 8,3 PPB na estação CSN no dia 15/10/2010.

Pode-se perceber pela figura 88 que, de maneira geral, os momentos em que o ozônio se encontra em seus níveis mais baixos são aqueles em que se observa a entrada de Frentes Frias. Tal fato se sucedeu nos dias 01 e 02/10/2010, 14 e 15/10/2010 e novamente ao final do mês no dia 30/10/2010.

Tal fato está relacionado à queda na temperatura, fator diretamente ligado ao aumento do ozônio. A presença de eventos de chuva poderia ser relacionada à queda nos níveis do poluente, contudo, observaram-se a presença dos mesmos em situações de atuação da Massa Tropical Atlântica, e o resultado foi diferente, o que descarta tal hipótese.

Igual aspecto foi observado em relação a velocidade do vento e umidade relativa do ar, em que, não se observou relação concreta entre ambos. No começo do mês, quando dá atuação de Frentes Frias, a umidade encontrava-se em níveis elevados, e os ventos a baixas velocidades, o ozônio por sua vez, apresentou níveis baixos.

Por outro lado, observando os dias 15 e 17/10/2010, constataram-se novamente altos níveis de umidade relativa do ar, e, desta vez, também altos níveis de ozônio. Igualmente a velocidade dos ventos, que no dia 08/10/2010 encontrou-se em seu valor mais alto, e no mesmo dia também foram registrados altos valores de  $O_3$  em todas as estações.

**FIGURA 88 – AUC - Tipos de Tempo x Ozônio – Outubro/2010**

FONTE: IAP e SIMEPAR. Org.: Castelhana (2019)

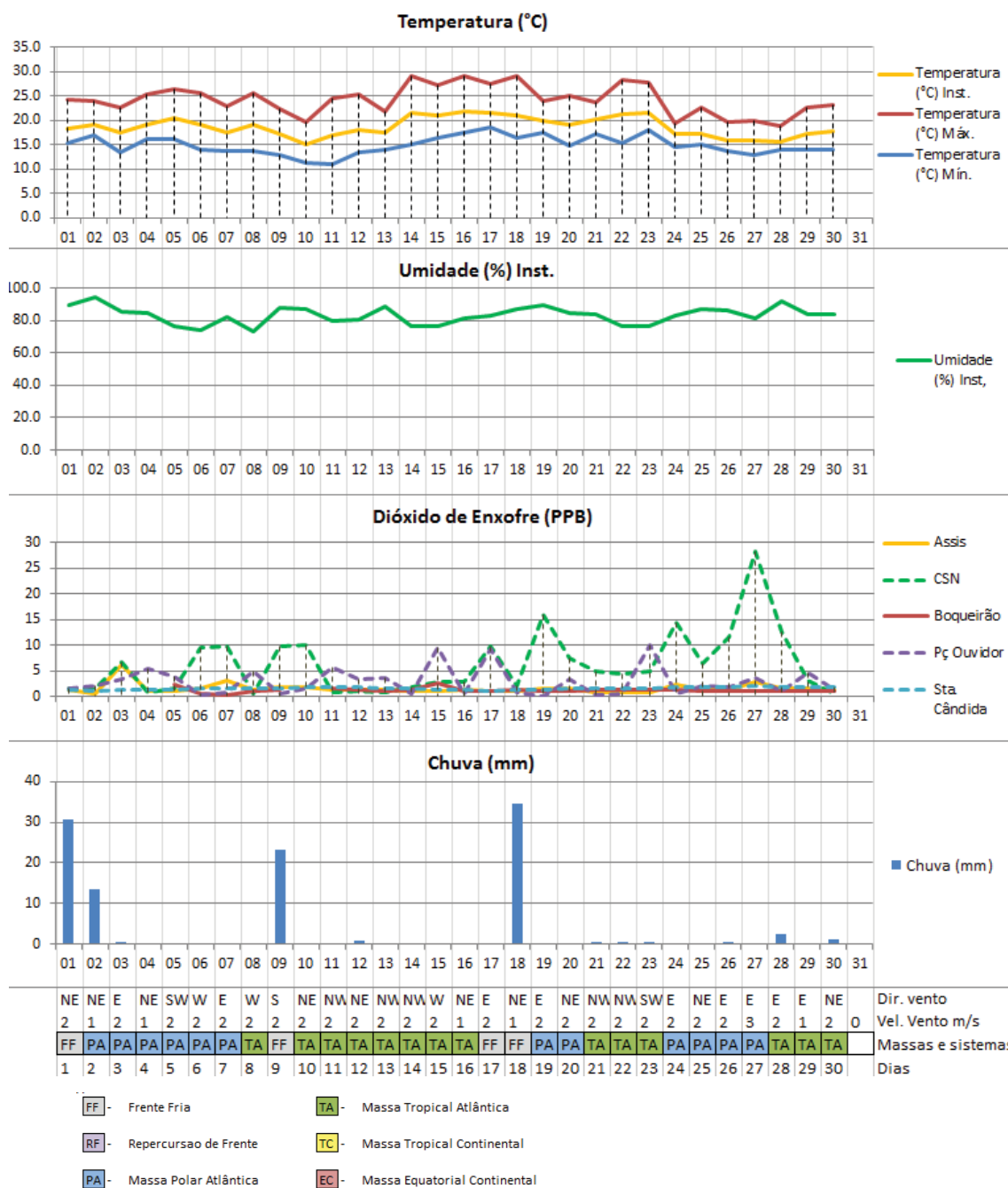
### III.5.2 Abril de 2011

O poluente  $\text{SO}_2$  foi aquela com maior diferença de valores de uma estação para outra em sua oscilação anual, conforme já observado neste capítulo e deflagrado também pela figura 89.

O poluente teve seu menor valor registrado na estação Praça Ouvidor Pardiniho, com 0,09 PPB no dia 19/04/2011 e seu maior na estação CSN, com 28,2 PPB no dia 27/04/2011.

Ao longo deste mês de análise percebeu-se a entrada de três frentes frias nos dias 01/04/2011, 09/04/2011 e 17 e 18/04/2011. Todos estes eventos foram acompanhados por chuvas acima de 20 mm. As mudanças nos tipos de tempo aparentemente não exerceram influência nos níveis de SO<sub>2</sub>.

**FIGURA 89 - AUC - Tipos de Tempo e Dióxido de Enxofre – Abril/2011**



FONTE: IAP e SIMEPAR. Org.: Castelhana (2019)

Verificaram-se baixos níveis de  $\text{SO}_2$  durante os eventos de chuva, contudo, os mesmos valores também foram registrados durante persistência de outros tipos de tempo.

Percebeu-se que durante a persistência de massas polares os valores de  $\text{SO}_2$  na estação CSN se elevavam, a ver nos dias 6 a 7/04/2011, 18 e 19/04/2011 e de 24 a 27/04/2011, contudo foi a única estação em que se percebeu tal fato (foi a estação com registros mais altos também).

### III.5.3 Abril de 2012

Para a análise rítmica realizada no mês de abril de 2012, comparou-se a circulação atmosférica com os valores de Dióxido de Nitrogênio para todas as estações de monitoramento, a exceção da estação Boqueirão, que, devido a problemas de manutenção, apresentou um número muito grande de falhas ocasionando sua exclusão nesta análise (Figura 90).

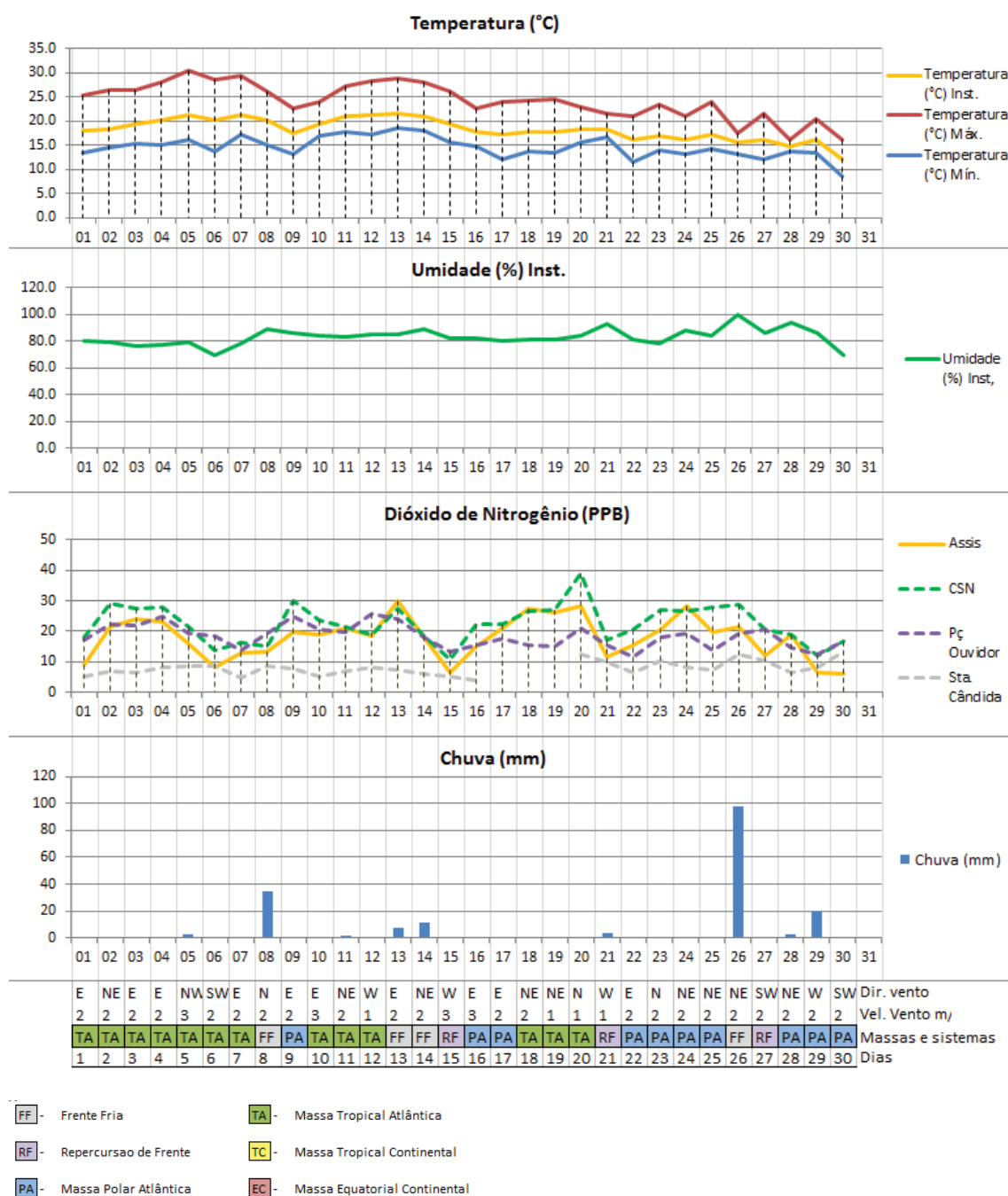
A análise revelou um início do mês com presença majoritária de sistemas tropicais ocasionando em temperaturas mais elevadas, a partir do dia 12/04/2012, observou-se a entrada frequente de Sistemas Polares e frontais, ocasionando quedas progressivas nas temperaturas e eventos de chuva.

Os níveis de  $\text{NO}_2$  para as quatro estações oscilaram de maneira muito próxima, com valores altos entre os dias 02 e 04, 09, 13, 20 e 24, e picos negativos nos dias 06, 15, 21 e 30. O maior valor do poluente neste período foi de 38,9 PPB na estação CSN, enquanto que o menor foi de 5,1 PPB na estação Santa Cândida.

Relacionando os tipos de tempo com os níveis de poluição, observou-se a ocorrência de valores mais altos durante episódios atmosféricos de característica estável (Massas Tropicais e Polares). Observou-se que o evento de maior nível de poluição, se sucedeu após três dias de ventos a baixas velocidades.

Não foi possível observar relações entre o  $\text{NO}_2$  e os valores Umidade relativa do ar ou temperatura. Já em relação a chuva, observou-se que os níveis de  $\text{NO}_2$  encontraram-se em fase de redução no momento ou logo após os eventos de chuva ocorridos, o que pode indicar uma relação inversa entre estes.



**FIGURA 90 – AUC - Tipos de Tempo e Dióxido de Nitrogênio – Abril/2012**

FONTE: IAP e SIMEPAR. Org.: Castelhana (2019)

### III.5.4 Julho de 2012

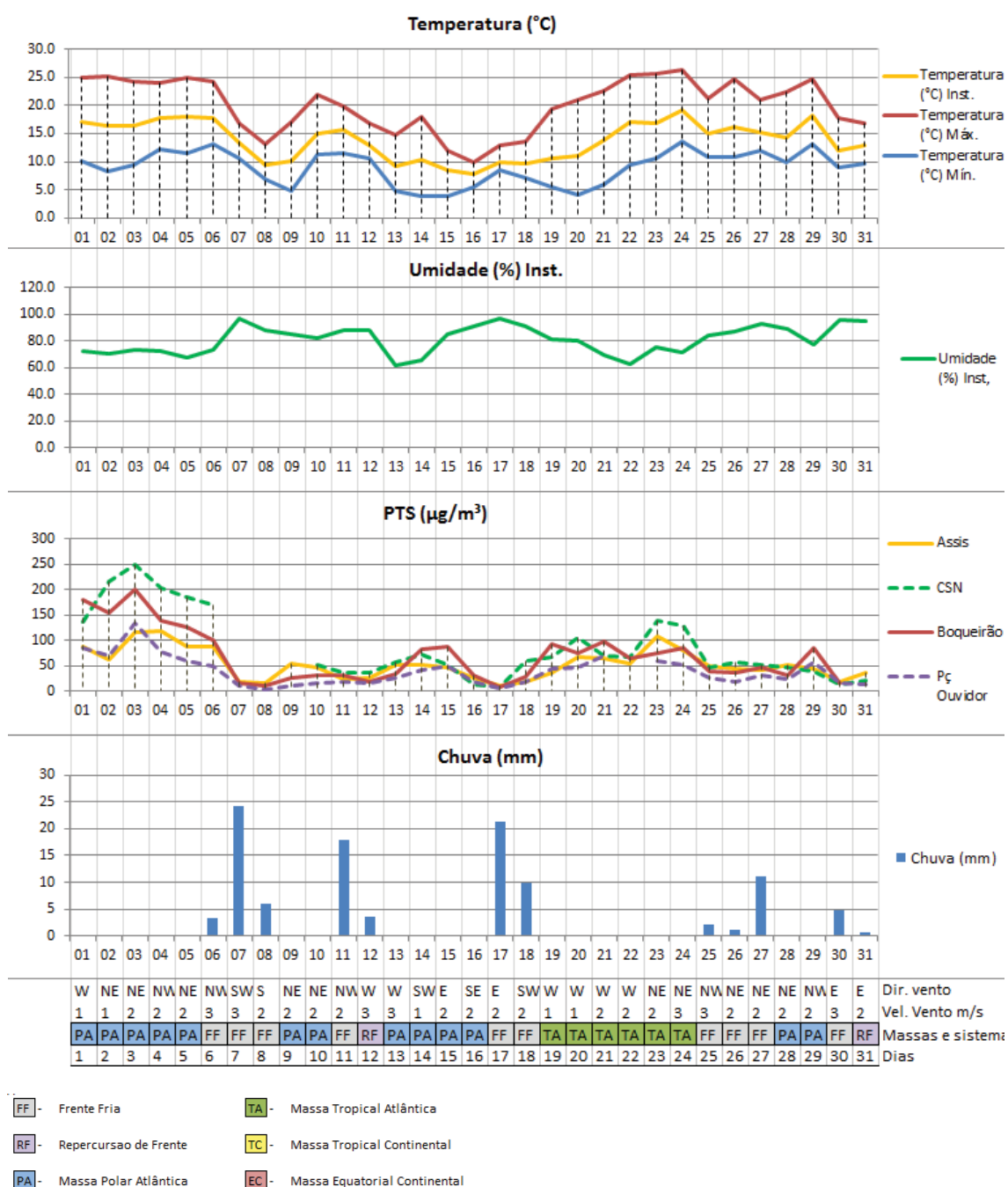
O mês de julho de 2012 registrou níveis altos de material particulado em suspensão para as quatro estações analisadas. Novamente observou-se que nos quatro pontos de coleta a oscilação do PTS se deu de maneira semelhante, com valores altos até o dia 06/07/2012, seguido por uma queda e nova ascensão apenas no dia 13/07/2012. Os valores voltam a cair no dia 16 e

apenas a partir do dia 20 passam apresentam notada subida para uma nova queda no dia 25.

O maior valor neste período foi de 250,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  no dia 03/07/2012 na estação CSN, enquanto que o menor foi de 3,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  no dia 08/07/2012 na estação alocada na Praça Ouvidor Pardinho.

A figura 91 revela uma relação entre as quedas nos níveis de PTS e a presença de Frentes Frias e Repercussões, portanto sistemas instáveis. Ao longo dos primeiros dias, durante manutenção de uma Massa Polar Atlântica, observou-se um alto nível na poluição inclusive neste momento quando se registrou o maior valor deste mês. Imediatamente a entrada de sistemas frontais, aumentando a umidade relativa do ar e trazendo grandes amontes de chuva, os níveis caem drasticamente.

O mesmo fato se sucedeu no restante do mês, como pode ser observado nos dias 09 e 10, com um princípio de aumento nos níveis de poluição seguido por nova queda com a entrada de uma frente no dia 11. Em seguida, um novo aumento até o dia 16, quando novamente a entrada de uma frente fria trazendo chuva reduz o nível de PTS. E mesmo eventos de chuva menores, como o registrado nos dias 25, 26, 30 e 31 já tiveram resultados sobre os níveis de PTS.

**FIGURA 91 – AUC - Tipos de Tempo e Partículas Totais em Suspensão – Julho/2012**

FONTE: IAP e SIMEPAR. Org.: Castellano (2019)

As análises realizadas neste capítulo permitiram atestar a situação de elemento condicionante atribuída a dinâmica no âmbito da dinâmica dos poluentes no AUC.

Observando as oscilações intra-anuais, pode-se perceber que o O<sub>3</sub>, o NO<sub>2</sub> e o PTS apresentaram oscilações semelhantes individualmente,

apontando que, os fatores que regem tais oscilações são os mesmos para as cinco estações analisadas.

A proximidade de vias emissoras foi o que garantiu a diferença nos valores totais destes poluentes. Isto fica evidente ao analisarmos as oscilações em dias da semana e horária, que demonstram o peso maior dos fatores determinantes (no caso, o tráfego de veículos). No caso do  $\text{SO}_2$ , a oscilação temporal específica da estação CSN revela o peso da região industrial sobre os níveis deste poluente.

Dentre os elementos climáticos, cita-se os efeitos dos ventos agindo de forma distinta sob cada poluente em cada localidade. A exceção fica por conta do  $\text{O}_3$ , único composto que, em todas as estações, demonstrou uma relação direta com a velocidade dos ventos, isto é, velocidade média abaixo de 2 m/s correspondiam a registros igualmente baixos.

O mesmo ozônio foi o único poluente que demonstrou uma relação direta com a temperatura do ar, enquanto que o  $\text{SO}_2$  demonstrou pouca ou nenhuma relação com os valores chuva, indicados pela alternância entre valores e baixos e altos de  $\text{SO}_2$  independentemente do tipo de chuva registrado. Os demais sempre registraram seus valores mais altos em dias secos, e com quedas gradativas a medida que a chuva se intensifica.

Traçada a relação entre o clima do AUC e o nível de seus poluentes, no capítulo a seguir serão estabelecidos cenários futuros para a qualidade do ar na área de estudo levando em conta a possibilidade de modificações na dinâmica climática.

## CAPÍTULO IV – PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O PROBLEMA DA QUALIDADE DO AR NO AUC

Visando atingir o objetivo específico III desta tese, este capítulo coloca em destaque a perspectiva futura da qualidade do ar no AUC, levando em conta os cenários e perspectivas de mudanças climáticas no AUC.

Discutiu-se ainda na introdução desta pesquisa, a função do clima enquanto condicionante aos níveis de poluição, devidamente detalhada no capítulo anterior que revelou a complexa e específica relação entre os poluentes PTS, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> com as variáveis climáticas através de uma série histórica de dez anos.

Sucintamente, os resultados obtidos anteriormente, demonstraram uma clara correlação entre os níveis de ozônio troposférico e a temperatura do ar, mais acentuada a partir de quando se tem valores acima de 20°C.

O PTS e o NO<sub>2</sub> demonstraram relação quase nula com a temperatura do ar, tendo registrado uma correlação mais significativa com a precipitação. De maneira mais clara o PTS registrou quedas significativas em todas as estações quando se tem registros de chuva a partir de 2,5mm.

O Dióxido de enxofre demonstrou maiores relações com a dinâmica dos ventos, embora tenha demonstrado maiores valores quando da ocorrência de dias secos.

Questiona-se agora como possíveis alterações nessas condicionantes poderão afetar os *outputs* do Sistema Poluição Atmosférica indicadas na figura 7, no capítulo I.

### IV.1 MÉTODOS E TÉCNICAS PARA A ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E QUALIDADE DO AR

Para analisar a relação entre a variabilidade climática e a qualidade do ar na RMC, será realizada primeiramente uma revisão bibliográfica sobre mudanças climáticas em Curitiba e em seguida uma análise estatística de dados históricos da estação meteorológica da mesma cidade que serão analisados sob a ótica das mudanças climáticas.

Para melhor interpretar e dar maior consistência estatística a esta análise buscou-se a série histórica mais longa disponível. Assim, foram coletados cinquenta e sete anos de dados meteorológicos diários (1961-2017) da estação

oficial do INMET, alocada no centro politécnico junto a estação utilizada anteriormente pertencente ao SIMEPAR e apontada pelo mapa da figura 1.

Estes cinquenta e sete anos de dados são a série mais antiga disponibilizada pela entidade apresentando homogeneidade e consistência de dados, justificando o tamanho da série utilizada.

Sabe-se que o clima de toda a região de Curitiba e Araucária não podem ser mensurados e estudados a partir de uma única estação meteorológica como é o caso, dado a grande variabilidade espacial dos fatores meteorológicos da região já apontados por Pinheiro (2016) e Kruger e Rossi (2015), por exemplo.

Todavia, dada a ausência de outras séries históricas de dados mais completas e longas como o presente, assumir-se-á que os valores encontrados para esta única estação podem ser extrapolados para toda a região estudada.

Para avaliar a variabilidade climática de Curitiba, buscou-se realizar uma análise estatística com base nos vinte e sete índices de mudanças climáticas propostos por Peterson et. al., (2001) e recomendados pela Organização Mundial Meteorológica. Os índices utilizam-se de dados em escala diária de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação, sendo conhecidos como “Índices ETCCDI<sup>4</sup>”.

Estes índices foram criados com o objetivo de facilitar a análise de alterações climáticas extremas a partir de dados em escala diária, suas análises em conjunto a testes estatísticos de tendência revelariam possíveis alterações ou variâncias nos climas em escala local.

Tendo como objetivo analisar possíveis consequências da variabilidade climática na qualidade do ar, optou-se pela utilização dos índices que pudessem indicar oscilações nas relações observadas no capítulo III desta tese.

Foram selecionados então apenas doze dentre os vinte e sete índices propostos pelo ETCCDI que de alguma forma podem vir a demonstrar relações com os poluentes analisados nesta pesquisa.

Dentre os analisados estão seis índices que trabalham diretamente com a variável temperatura. São eles, Número de dias de Verão (SU) que registra

---

<sup>4</sup> Sigla para *Expert Team on Climate Change Detection and Indices*, parte do *World Climate Research Programme*, parte por sua vez da Organização Meteorológica Mundial e da ONU



uma contagem anual de dias em que a temperatura máxima diária ultrapassou os 25 °C; Número de Noites Tropicais (TR) que contabiliza anualmente os dias em que a temperatura mínima é superior a 20 °C; Temperaturas máximas das máximas (TXX), que aponta o valor máximo da temperatura máxima por mês; Temperaturas Máximas Mínimas (TXN) , que registra o menor valor mensal dentre os registros de Temperatura Máxima; Temperatura Mínimas máximas (TNX) que registra o maior valor mensal dentre as temperaturas mínimas e as temperaturas mínimas da mínimas (TNN) que registram os menores valores mensais das temperaturas mínimas.

Os outros seis índices debruçam-se sobre os dados de chuva diária, são eles : Chuva Mensal Máxima diária (RX1DAY) que registra o valor máximo de chuva diária por mês; Índice simplificado de intensidade de chuva (SDII) que registra a quantidade de chuva dividida pelo número de dias com chuva por ano; Dias com registro de chuva acima de 2,5 mm (RNNMM); Dias secos Contínuos (CDD), que registra o número máximo de dias seguidos sem chuva por ano; Dias úmidos contínuos (CWD), que registram a contagem anual de dias consecutivos com registros de chuvas e por fim o total de precipitação anual (PRCPTOT).

A tabela 9 aponta os índices calculados para Curitiba, assim como suas respectivas descrições, e poluentes relacionados.

A análise de tendência dos índices previamente gerados se deu através do cálculo de tendências de *Mann Kendall* (MANN, 1945, KENDALL, 1975). Tal técnica aponta a existência ou não de uma tendência monotônica ao crescimento ou a queda nos valores analisados.

O Teste de *Mann Kendall* se encaixa como um teste estatístico não-paramétrico, portanto, ideal para analisar tendências de series históricas consideradas sem distribuições normais e sem a necessidade de independência entre os dados amostrais, tornando-o um dos testes de tendência mais utilizado nas análises de series históricas de dados climáticos (PINHEIRO, 2016; MOREIRA e NAGHETTINI, 2016), assim como, também amplamente utilizado em conjunto ao cálculo dos indices climáticos supracitados (RAZAVI et. al., 2016; KEGGENHOFF et. al., , 2014).

A aplicação do teste de *Mann Kendall* se sucedeu através do pacote Kendall para R, e gera como resultados os valores “*p-value*” e “*tau*” que

apontam a presença ou não de tendências monotônicas e o seu sentido (positivo ou negativo) respectivamente.

**TABELA 9**– Índices de Variabilidade Climática Utilizados e os Poluentes afetados

Índice	Sigla	Descrição	Poluente Afetado
Número de Dias de Verão	SU	Contagem anual de dias em que a T <sub>máx</sub> > 25°C	O <sub>3</sub>
Número de Noites Tropicais	TR	Contagem anual de dias em que a T <sub>min</sub> > 20°C	O <sub>3</sub>
Temperaturas Máximas das Máximas	TXX	Valor máximo de temperatura máxima diária por mês	O <sub>3</sub>
Temperaturas Máximas das Mínimas	TNX	Valor máximo de temperatura mínima diária por mês	O <sub>3</sub>
Temperaturas Mínimas das Máximas	TXN	Valor mínimo de temperatura máxima diária por mês	O <sub>3</sub>
Temperaturas Mínimas das Mínimas	TNN	Valor mínimo de temperatura mínima diária por mês	O <sub>3</sub>
Chuva Mensal Máxima Diária	RX1DAY	Valor máximo de chuva diária por mês	PTS; NO <sub>2</sub>
Índice Simplificado de Intensidade de Chuva	SDII	Soma das precipitações em dias com chuva dividido pelo número de dias com chuva no ano	PTS; NO <sub>2</sub>
Chuva acima de 2,5mm	RNNMM	Contagem anual de dias com precipitação acima de 2,5mm	PTS; NO <sub>2</sub>
Dias Secos Contínuos	CDD	Contagem anual do maior número de dias seguidos em que a prec. < 1mm	PTS; NO <sub>2</sub> ; SO <sub>2</sub>
Dias Úmidos Contínuos	CWD	Contagem anual do maior número de dias seguidos em que a prec. > 1mm	PTS; NO <sub>2</sub> ;
Precipitação Total	PRCPTOT	Total anual de precipitação	PTS; NO <sub>2</sub> ;

FONTE: ETCCDI (2001) Org.: Castelhana (2019)

Considerou-se para o teste aplicado, o nível de significância de 95% que indica ou não a presença de tendências monotônicas. Se considera como indicador de tendência os valores de *p-value* inferiores a 0,05. Já o valor de tau, se positivo, indica uma tendência ao crescimento, e quando negativo, aponta uma tendência ao decréscimo.

Na sequencial realizou-se uma análise das tendências futuras para os poluentes analisados nesta pesquisa, embasados pelas series históricas de dados fornecidas pelo IAP (2005-2014).

O cálculo de tendência escolhido foi a metodologia de Theilisen. Observando que as series históricas dos poluentes são considerados não-normais e possuem uma variância de erro não-constante este método é considerado como o mais apropriado (CARSLAW E ROPKINS, 2012), sendo comumente utilizado na descrição de comportamento e tendências de poluentes (MUNIR et. al., 2013; ANCELET et. al., 2015, BIGI e GHERMANDI, 2014; SZULECKA et. al., 2017, OLSTRUP et. al., 2018).

O cálculo de Theilisen foi aplicado através do pacote *Openair* junto ao *software* R, o mesmo pelo qual se geraram os gráficos, que indicam a direção e força da linha de tendência e a média mensal do poluente analisado.

Partir-se-á então para uma análise conjugada das tendências de poluentes e das tendências climáticas observadas, possibilitando a prospecção de problemas no âmbito da qualidade do ar para a RMC.

#### IV.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E VARIABILIDADE CLIMÁTICA EM CURITIBA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No âmbito da discussão acerca das mudanças climáticas o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) surge como principal órgão de pesquisa a nível mundial, agregando cientistas e pesquisas de múltiplas áreas do conhecimento e de países de todo o globo.

O IPCC surge em 1988 como órgão oficial da ONU para assuntos relativos ao impacto do homem no clima e desde então, publica na forma de relatórios prospecções embasadas por modelos estatísticos de cenários possíveis para o clima a nível mundial.

Os modelos e seus resultados, amplamente discutidos e criticados, surgem como principal embasamento para políticas públicas e pesquisas no âmbito das mudanças climáticas.

O último relatório publicado em 2014 chamado AR5 aponta primeiramente um aumento médio global de 0,9 °C em comparando o ano de 1850 a 2005 e aponta um possível crescimento que varia de 0,3 °C a 4,8 °C até 2100 em relação a temperatura global média do período 1985-2005 (IPCC,2014).

A variação na prospecção se dá em função dos diferentes cenários projetados pelos cientistas do órgão e chamados de *Representative Concentrations Pathways* (RCP's). Os RCP's indicam projeções nas emissões

de CO<sub>2</sub> e por consequência no clima da Terra, indo do cenário mais otimista que indicaria uma redução nas emissões do gás para o cenário mais pessimista que supõe um aumento crescente neste poluente.

Segundo Marengo (2014) os diferentes RCP's indicam a incerteza por trás dos cenários futuros para o clima, mas todos, de maneira geral indicam aumento de temperaturas.

O relatório por si só não se aprofunda especificamente na questão brasileira, cabendo aos órgãos locais a tarefa de agregar estudos específicos e aprofundar a escala dos modelos globais do IPCC a realidade brasileira, realizando o chamado *downscaling*.

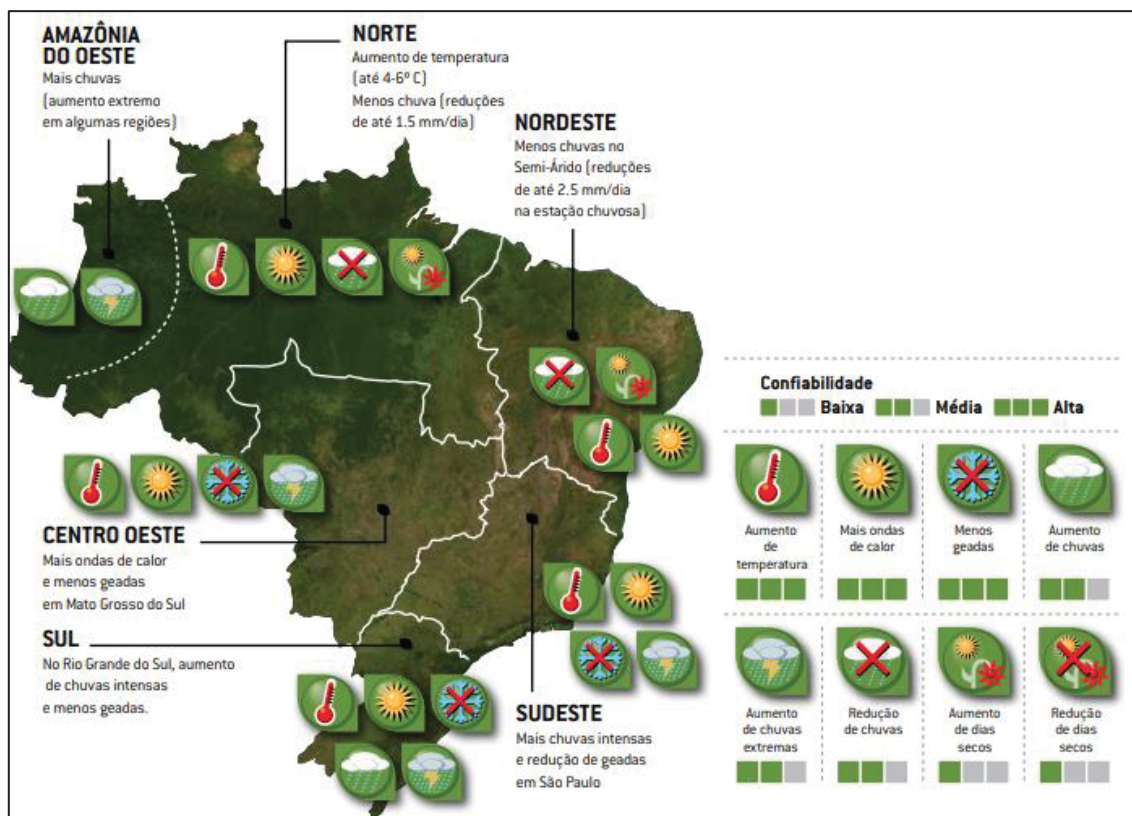
O AR5 direciona um capítulo específico para as Regiões centro e Sul-americana, o qual indica possíveis cenários no âmbito regional. A região Sul do continente Sul-americano tem projetado aumentos na temperatura até 2100 que podem variar entre 0,6 °C a 2 °C no cenário mais otimista e de 2.2 °C até 7 °C para o cenário mais pessimista. No âmbito da chuva, os cenários para 2100 projetam uma oscilação de -10% a +20% para a região Sul da América do Sul.

Os cenários apresentados pelo IPCC reafirmam sobretudo a incerteza dos cientistas sobre o clima futuro para a região onde Curitiba está inserida. Falar em cenários de oscilação de chuva entre -10% a +20% se traduz em assumir que poder-se-ia ter aumento nas chuvas, diminuição nas chuvas ou nenhuma mudança, portanto, algo totalmente incerto.

Neste sentido, o relatório reafirma a necessidade de se realizarem estudos de tendência específicos e *downscallings* para melhor detalhar as projeções climáticas e dar maior segurança aos cenários propostos.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi o responsável por realizar a primeira projeção *downscaling* para o Brasil com base no modelo HadRM3P (INPE,2007), modelo este utilizado pelo IPCC em seu terceiro relatório, e projetando o clima do Brasil em dois cenários hipotéticos, um em que as emissões aumentariam (chamado de Cenário A2) e outro em que as emissões iriam gradativamente diminuindo (chamado de Cenário B2)

A figura 92, elaborada por Margullis e Dubeux (2010) sintetiza os cenários projetados para as regiões do Brasil com base nas projeções modeladas em 2007 pelo INPE para 2100.

**FIGURA 92–** Mudanças Climáticas no Brasil.

FONTE: Margullis e Dubeux (2010).

Para a região do Sul modelaram-se cenários em que se observarão aumento de temperaturas e mais frequência nas ondas de calor. O cenário mais pessimista (A2) aponta um aumento de até 6 °C na média anual de Curitiba para 2100, podendo passar deste valor durante a primavera. O cenário mais otimista (B2) projeta um incremento na média anual de até 3 °C, novamente indicando a primavera como a estação com maior aumento médio.

Em relação as chuvas, os cenários indicam aumento de chuvas, sobretudo no período de outono, que no caso de Curitiba, variariam entre 10 a 20% de aumento. Para o inverno, todavia, projetaram-se anomalias negativas de até 10% no volume de chuvas para a região estudada.

Dois anos após esta primeira projeção foi criado o PBMC, órgão que segue os parâmetros do IPCC, congregando mais de trezentos pesquisadores brasileiros e estrangeiros, de múltiplas áreas e realizando relatórios específicos para os cenários brasileiros (MARENGO,2014).

O PBMC publicou seu primeiro relatório em 2014, embasando-se nos modelos utilizados pelo IPCC em seu quarto relatório publicado em 2007 e,

portanto, com certa defasagem. O relatório traz um capítulo para cenários específicos de cada região brasileira. No que tange os cenários para a região Sul do Brasil é apontado pelo órgão aumentos na temperatura gradativos até o ano de 2080.

Revelou-se a perspectiva de aumentos entre 0,6 °C a 1,1 °C nas temperaturas médias para a região Sul do Brasil até 2020, podendo chegar a 4,5 °C até 2080, o relatório indica ainda que os meses de verão apresentarão maiores aumentos de temperatura.

As incertezas se mantem nos cenários que tangem o regime hidrológico da região Sul do Brasil. É apontado uma oscilação entre -5% e + 3% no total de chuvas para os meses de inverno até o ano de 2020, podendo oscilar entre - 12% e +12% até 2080 no mesmo período (PBMC,2014).

O verão poderá oscilar entre -3% e +5% até 2020 até -10% a +10% no ano de 2080, portanto, oscilando menos que o inverno.

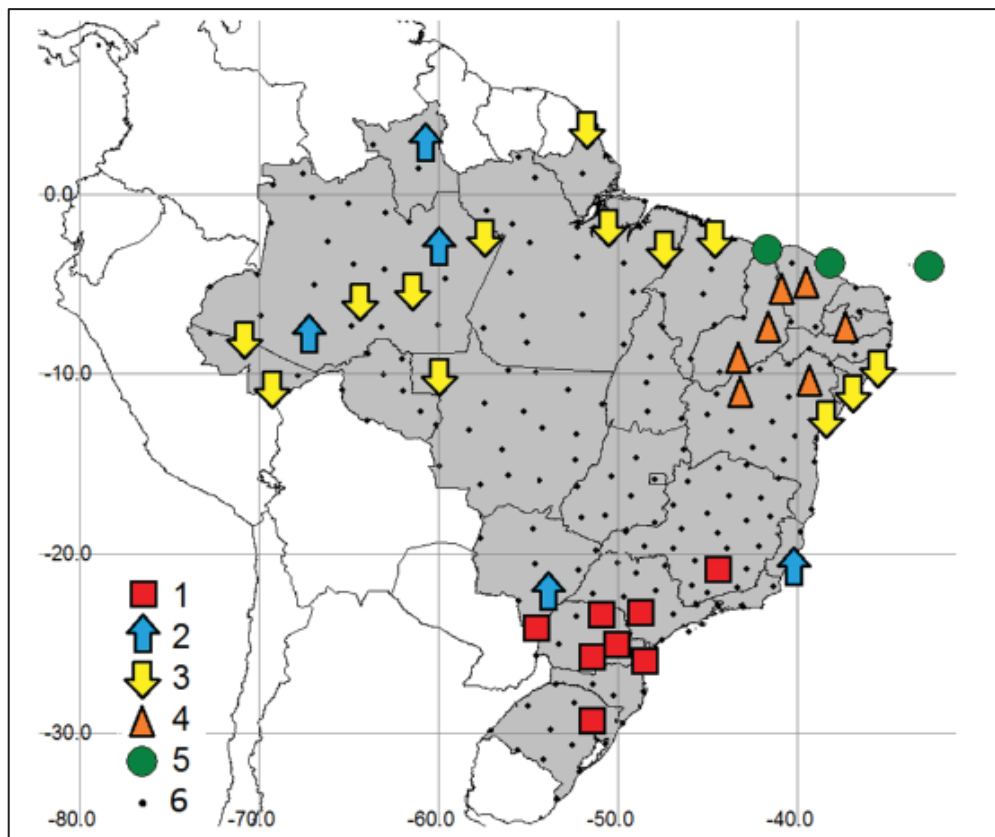
Este relatório já nos trouxe cenários menos intensos em relação ao visto no primeiro *downscaling* realizados para o Brasil sob os modelos do terceiro relatório do IPCC, mas o grau de incertezas persiste.

Realizando um estudo sem utilizar modelos e projeções futuras, Dubreuil et. al., (2018) analisaram o clima do Brasil sob a ótica da Classificação de Koppen. Os pesquisadores levantaram dados de 208 estações meteorológicas do Brasil e as dividiram entre o período 1964-1989 e 1990-2015, analisando em cada estação meteorológica os tipos de clima anuais seguindo a classificação de Koppen mais frequentes e como os mesmos se alteraram de um período a outro.

A figura 93, de autoria de Dubreuil et. al., (2018) sintetiza as mudanças encontradas na pesquisa.



**FIGURA 93** – Síntese de Mudanças observadas na Classificação de Koppen no Brasil entre os anos de 1964-1989 e 1990-2015. – (1) Mudança para um clima mais quente; (2) Mudança para um clima mais úmido; (3) Mudança para um clima mais seco; (4) Mudança para um clima mais árido; (5) outro tipo de mudança; (6) sem mudança



FONTE: Dubreuil et. al., (2018)

Curitiba é citada pelos autores como uma cidade que, apesar da altitude, experimentou uma mudança em sua classificação, passando de um clima de tipo Cfb (Clima subtropical, úmido com verão com temperaturas abaixo de 22°C) para o tipo Cfa, (Clima subtropical, úmido e com verão quente e inverno brando), deflagrando sobretudo o aumento nas temperaturas observado na cidade.

Segundo Mendonça (2012) a região Sul do Brasil seria, dentre as regiões brasileiras, a porção em que as mudanças climáticas globais mais se manifestariam. Observando as tendências para uma série de dados de 1975 a 2004, o autor constata uma elevação média de 1,3°C nos estados que compõem a região Sul do país.

Em Curitiba especificamente, constatou-se tendências ao aumento nas temperaturas máximas, médias e mínimas. O autor constatou ainda, igual tendência para a precipitação acumulada e para a umidade relativa do ar. Analisando uma série mais extensa, de 1977 a 2012, no mesmo trabalho, o

autor aponta a prevalência das tendências e aponta os anos finais da década de 2010 como aqueles em que as temperaturas da capital paranaense foram as mais elevadas.

Analisando as tendências e variabilidades climáticas para o clima do estado do Paraná, Nogaroli e Mendonça (2012) destacaram novamente o aumento das temperaturas em Curitiba, dando ênfase a tendência significativa encontrada para as temperaturas mínimas.

Evidenciando a questão da precipitação e analisando dados de 1980 a 2010, Pinheiro (2016) evidencia a ausência de tendência para esta variável na região da Bacia do Alto Iguaçu, a qual Curitiba está inserida.

A autora apontou que apenas para o período da primavera se observaram de fato tendências positivas ao aumento no volume e na intensidade das chuvas na região.

Poucos são os estudos que relacionam os cenários de mudanças climáticas com a dinâmica dos ventos, outra variável que se relaciona diretamente com a qualidade do ar.

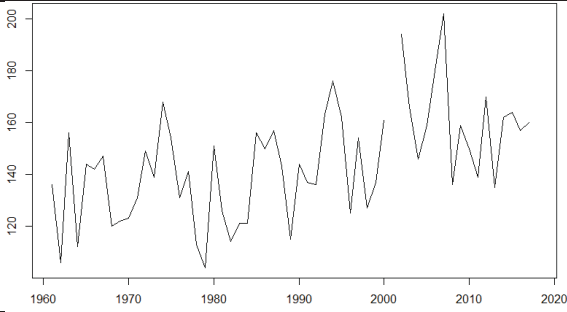
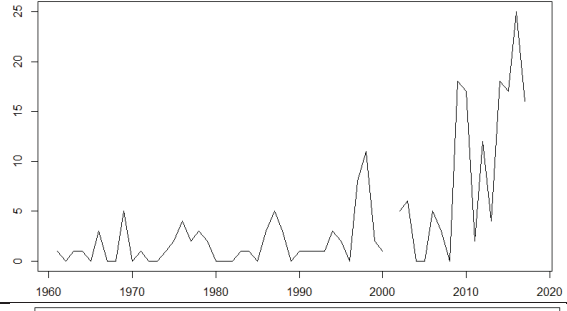
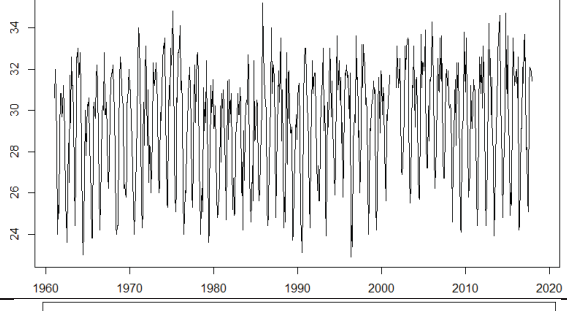
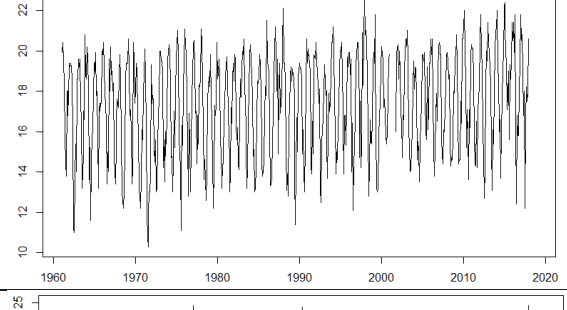
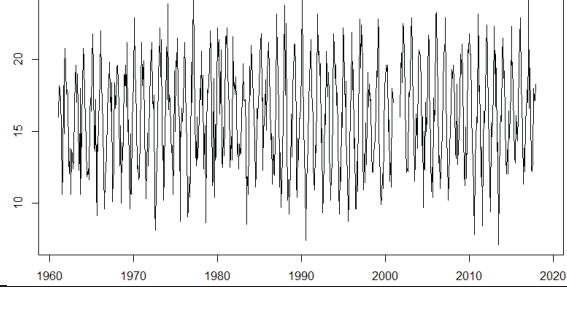
Eichelberger et. al., (2008) evidenciam que as alterações nas temperaturas de superfície apresentam condições para que a velocidade média dos ventos a nível de superfície aumentam. O autor indica inclusive que a região Sul do Brasil apresenta potencial para crescimento em energia eólica dados os cenários que se desenham para o aumento na velocidade dos ventos.

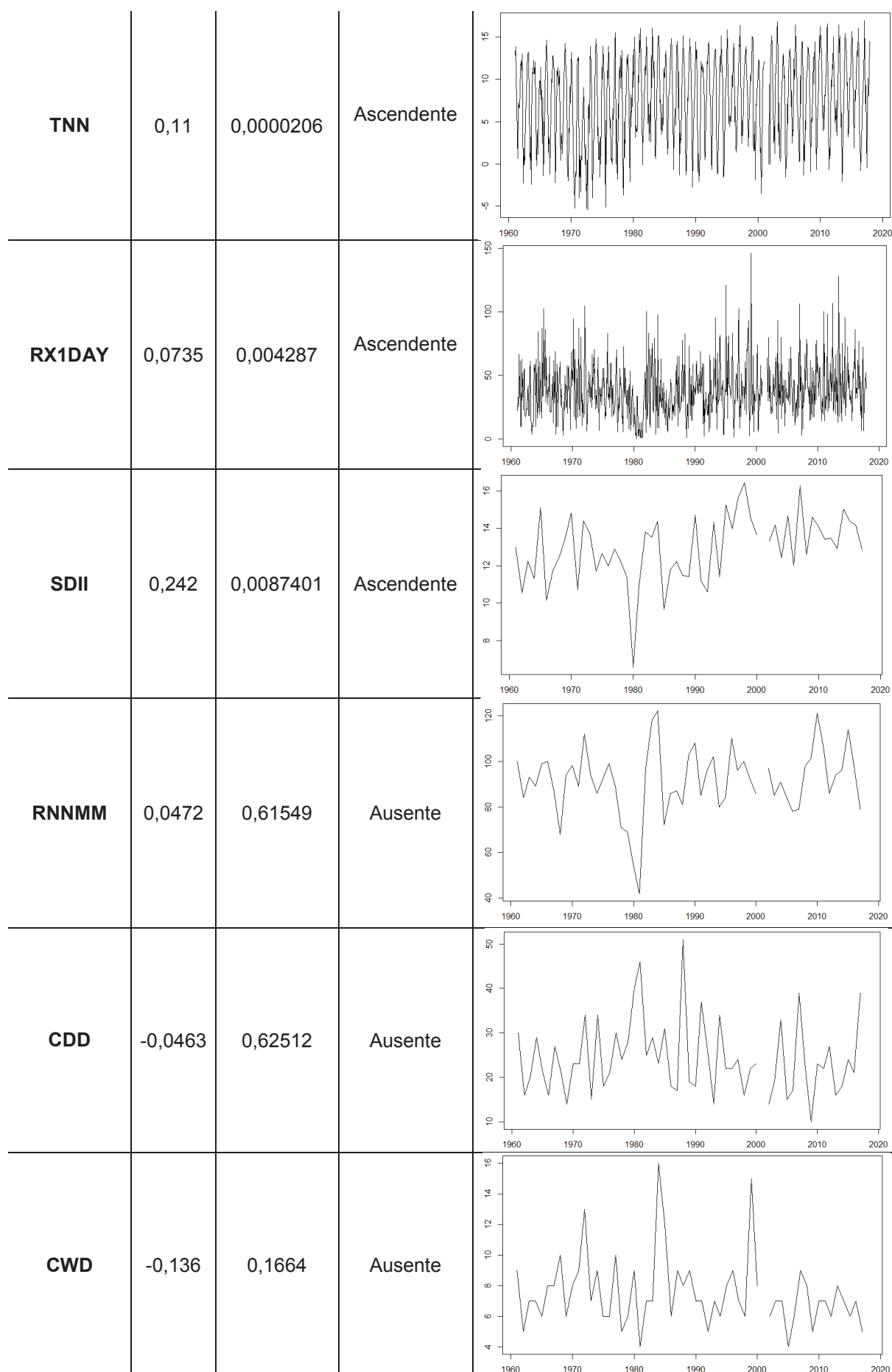
#### IV.3 VARIABILIDADE CLIMÁTICA EM CURITIBA ASSOCIADA A QUALIDADE DO AR

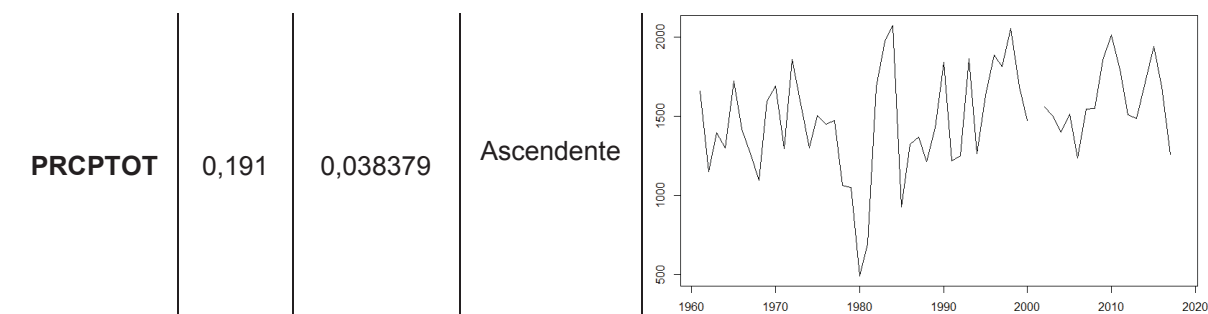
Complementando a revisão bibliográfica anteriormente realizada, buscaram-se testes de tendência para alguns índices mencionados no subcapítulo IV.1 que apresentam maior relação com os poluentes atmosféricos aqui analisados.

Os testes de *Mann Kendall* aplicados aos índices escolhidos revelaram tendências positivas em sua quase plenitude. A tabela 10 apresenta os resultados deste teste estatístico sintetizado, trazendo o p-valor, tau, direção da tendência e a serie temporal analisada.

**TABELA 10 – AUC - Tendências observadas nos índices Climáticos calculados**

INDICE ETCCDI	TAU	P-VALOR	TENDÊNCIA	SERIE TEMPORAL
<b>SU</b>	0,344	0,0001945	Ascendente	
<b>TR</b>	0,404	0,000035	Ascendente	
<b>TXX</b>	0,0962	0,00020266	Ascendente	
<b>TNX</b>	0,125	0,00000143	Ascendente	
<b>TXN</b>	0,036	0,16365	Ausente	





Org.: Castelhana (2019)

Os índices de dias contínuos com chuva (CWD) e dias contínuos secos (CDD) não apresentaram tendências, seguindo o esperado pela revisão bibliográfica. Estes índices influenciariam diretamente os poluentes PTS, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, pois, conforme se constatou, sequencias de dias com chuva tendem a facilitar a deposição e por consequência a diminuição nos níveis destes compostos.

O índice de dias com registro de chuva acima de 2,5mm (RNNMM) também seguiu a mesma lógica, apontando ausência de tendência. Constatou-se no capítulo III que valores de precipitação acima de 2,5mm diária é suficiente para auxiliar na deposição de material particulado e dióxido de nitrogênio.

Aliado a estes valores, foram encontradas tendências positivas para os valores totais de chuva (PRCPTOT), valores máximos de chuva diária (RX1DAY) e na intensidade das chuvas (SDII).

Estes dados, em conjunto aos citados anteriormente, indicam uma tendência ao aumento nos totais de chuva, mas não no número de dias com chuva, portanto, aumentando a intensidade do volume de precipitação, mas não necessariamente sua temporalização, novamente indo de acordo com a literatura.

Esta variabilidade observada nos índices relativos a chuva terá pouca interferência nos níveis de poluição. No capítulo III revelou-se que mesmo temporalmente curta, a chuva a partir de 2,5 mm auxilia diretamente na deposição de poluição e que, portanto, chuvas menos intensas e mais esparsas em dias seguidos tem efeito melhor sob a qualidade do ar.

Os cálculos aqui apresentados indicam que as chuvas seguem ocorrendo nos mesmos períodos de tempo, ou seja, não irão ocorrer um maior número de dias chuvosos por ano, mas sim um maior volume de água precipitando.

Em contrapartida os índices relativos a temperatura se mostrou com tendências positivas e novamente seguem o mencionado pela literatura. O único índice que abarcava a variável térmica sem tendências registrada foi o TXN (temperaturas mínimas das máximas).

Ao longo do capítulo III observou-se uma relação direta com os níveis de ozônio troposférico, dada a sua natureza química e da necessidade de radiação solar para sua gênese.

Constatou-se que após temperaturas superiores a 18° C o os níveis do poluente crescem linearmente junto a temperatura.

O índice TR (Noites tropicais) revela a contagem anual de dias em que a temperatura mínima diária excede os 20° C, o que por consequência pode ter um efeito direto nos níveis de ozônio. Os resultados revelam uma forte tendência ao crescimento deste índice. Observando ainda o gráfico apresentado na tabela 9 percebe-se que este índice parte de menos de dois dias por ano nos anos 60 para mais de vinte nos dias atuais.

As temperaturas mínimas também apresentaram tendências positivas, tanto o índice que calcula observa as temperaturas mínimas mais baixas (TNN) quanto o que aponta as temperaturas mínimas mais elevadas (TNX). Estes índices, aliados as Temperaturas máximas das máximas (TXX) que também apresentou tendências positivas, indicam um aumento gradual nas temperaturas de Curitiba nos último cinquenta e sete anos sem necessariamente aumentar a amplitude térmica.

#### IV.4 TENDENCIAS PARA OS POLUENTES EM CURITIBA ASSOCIADA A MUDANÇAS NO CLIMA

No que tange as tendências para dióxido de enxofre, observou-se uma similaridade entre os cinco pontos da cidade analisadas. Todas apresentaram tendências quase nulas, com valores muito próximos a zero, o que indicaria ausência de tendência.

A figura 94, posteriormente complementada pela figura 95, traz os gráficos para cada ponto de coleta, assim como as linhas de tendência em vermelho, os valores positivos ou negativos da tendência em unidades por ano e entre colchetes os valores da tendência no intervalo de confiança de 95%. É retratado no gráfico os valores médios mensais do poluente por estação.

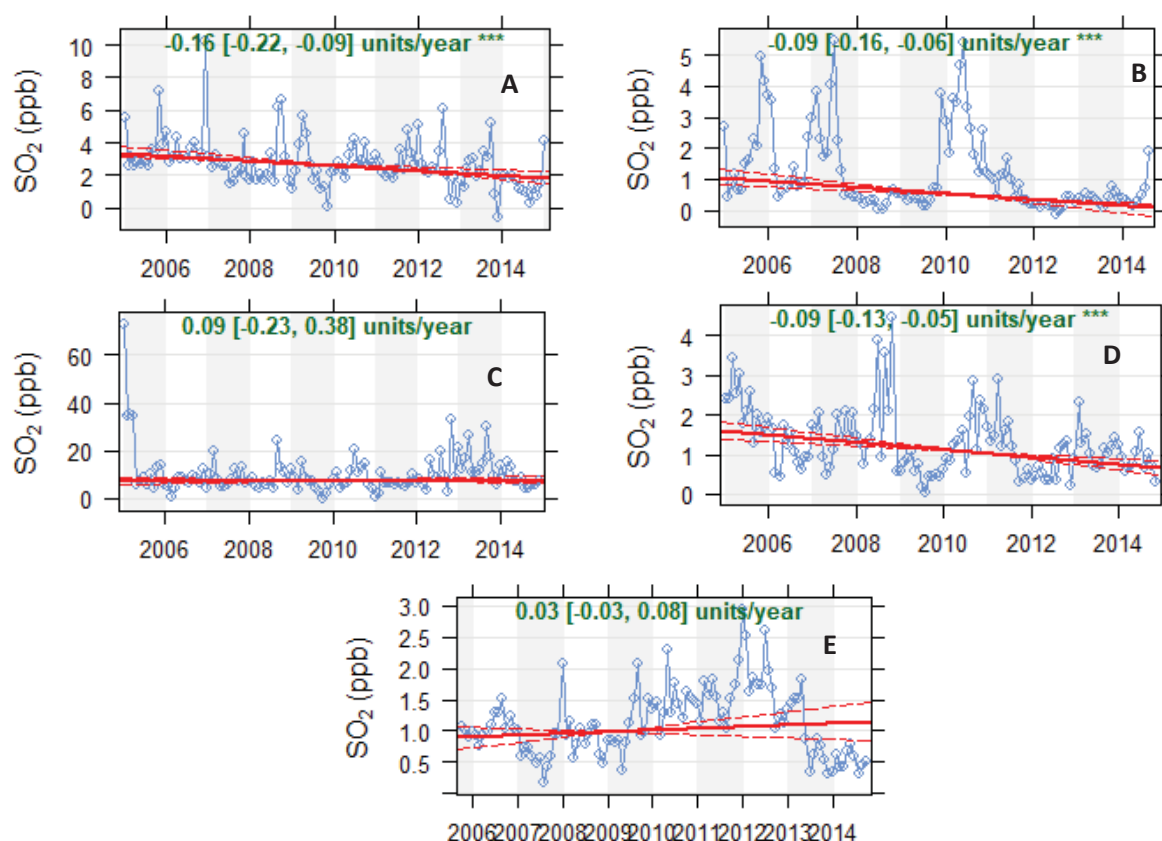


As estações CSN e Santa Cândida foram as únicas a apresentar tendência positiva, com valor de 0.09 para a primeira e 0.03 na segunda. No caso da CSN, esta tendência era esperada pela presença constante de emissões industriais na região. Apesar de uma queda significativa nos valores médios, observados a partir de 2005, os níveis de  $\text{SO}_2$  voltam a subir a partir de 2012.

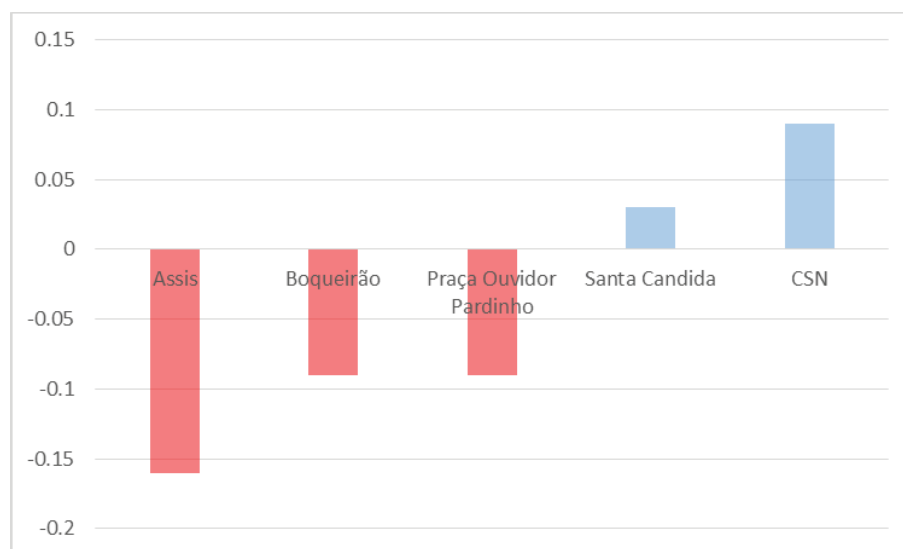
Na estação Santa Cândida, apesar da tendência positiva, os valores totais ainda se encontram relativamente baixos, com médias mensais inferiores a 3 ppb, em função de sua localização em um bairro residencial de baixa densidade.

Já nos demais locais, observou-se decréscimo nos valores médios de  $\text{SO}_2$ . O maior deles observado na estação Assis, -0.16, seguido por Boqueirão e Praça Ouvidor Pardinho com -0.09.

**FIGURA 94** – AUC - Tendência de Theilisen aplicado ao  $\text{SO}_2$  ; A – Assis; B- Boqueirão; C- CSN; D- Praça Ouvidor Pardinho; E- Santa Cândida.

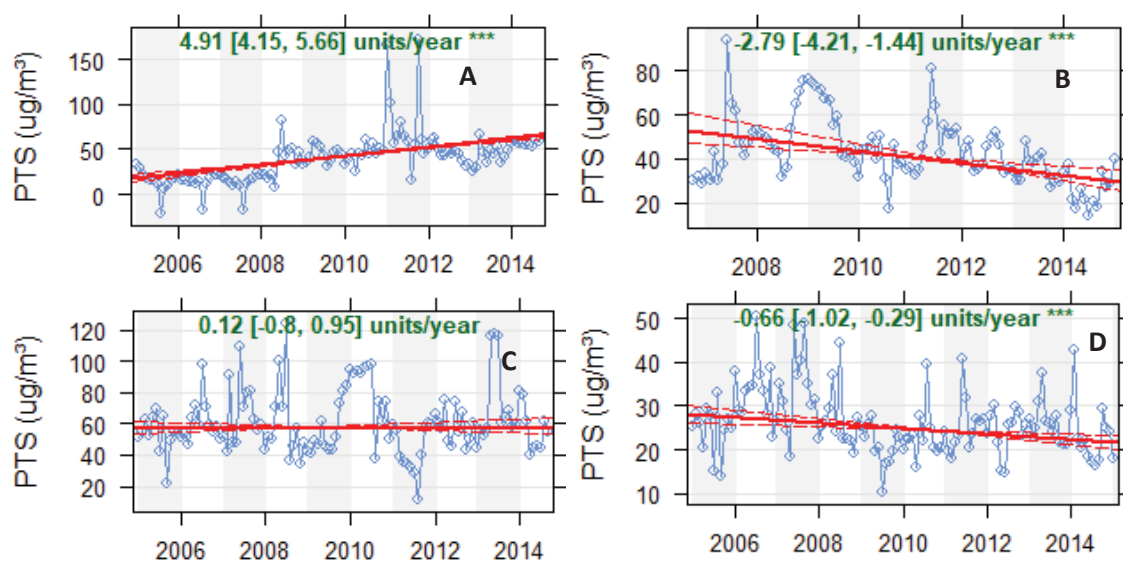


Org.: Castelhana (2019)

**FIGURA 95** – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao SO<sub>2</sub>.

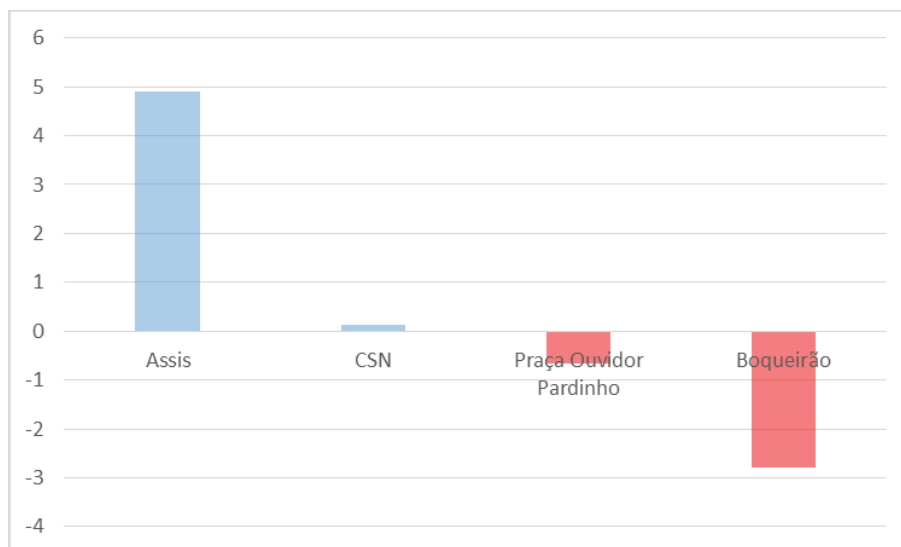
Org.: Castellano (2019).

As tendências para Material Particulado Grosso (PTS) estão descritas nas figuras 96 e 97. A estação Santa Cândida, por ausência de dados não teve sua tendência calculada.

**FIGURA 96** – AUC - Tendência de Thielsen aplicado ao PTS; A – Assis; B- Boqueirão; C- CSN; D- Praça Ovidor Pardini.

Org.: Castellano (2019).

Os valores positivos foram observados apenas nas estações em Araucária, portanto mais próxima as zonas industriais de Curitiba. Assis apresentou uma tendência positiva com valores relativamente altos, 4.91, enquanto que CSN apresentou uma tendência muito próxima a zero com 0.12.

**FIGURA 97–** AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao PTS.

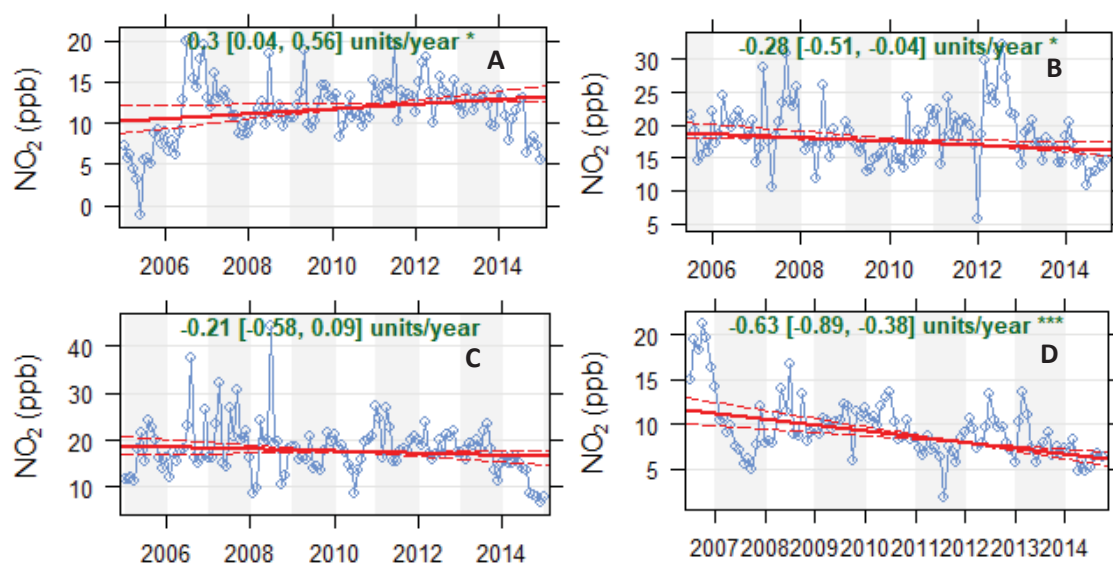
Org.: Castelhana (2019).

Mesmo situando-se na região central da cidade, onde o trânsito de veículos é mais intenso, a tendência na estação Praça Ouvidor Pardinho foi de decréscimo, com um valor de  $-0.66$ . A estação Boqueirão também registrou tendência a queda, ainda mais intensa com  $-2.79$ .

O excesso de falhas na série de  $\text{NO}_2$  para a estação Boqueirão impediu o cálculo de tendência para este ponto, possibilitando o cálculo para apenas quatro pontos.

Os valores observados foram relativamente baixos, com o único local com tendência ao aumento a estação Assis com  $0.3$ . Os pontos Praça Ouvidor Pardinho e CSN registraram tendências a queda com  $-0.21$  e  $-0.28$  respectivamente.

**FIGURA 98** – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao NO<sub>2</sub>; A – Assis; B- CSN; C- Praça Ouvidor Pardiniho; D – Santa Cândida.



Org.: Castelhana (2019).

A localidade com tendência negativa mais expressiva para este poluente foi a estação Santa Cândida, na região mais distante do centro da cidade e com menos trânsito de veículos, apresentando uma tendência a queda em - 0.63.

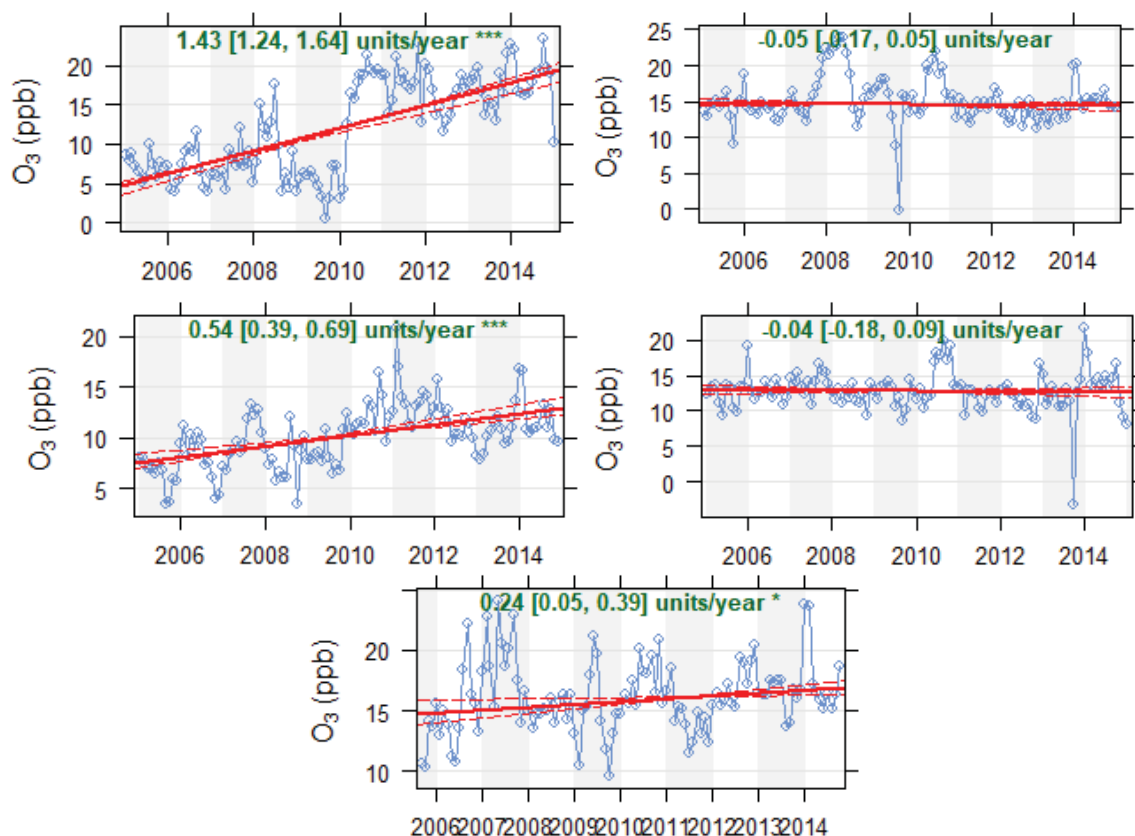
**FIGURA 99**– AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao NO<sub>2</sub>



Org.: Castelhana (2019)

O ozônio troposférico foi o poluente que mais demonstrou tendências ao aumento nas estações analisadas nesta pesquisa, com tendências positivas nas estações Assis e CSN ambas em Araucária e na estação Santa Cândida na porção Norte de Curitiba.

**FIGURA 100** – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao O<sub>3</sub> – A – Assis; B- Boqueirão; C- CSN; D- Praça Ouvidor Pardiniho; E – Santa Cândida.



Org.: Castellano (2019).

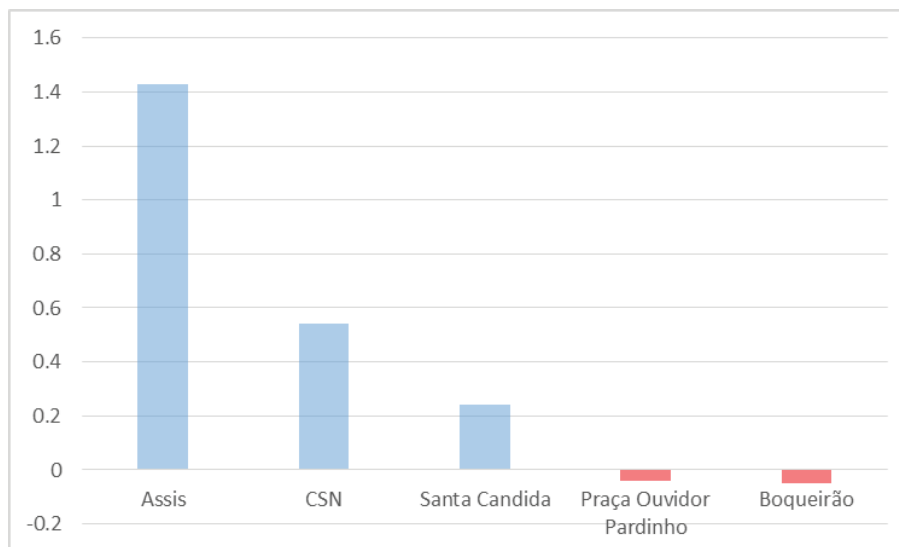
Na estação Assis, o valor observado foi de 1.43, seguido por 0.54 na CSN e 0.20 na estação Santa Cândida. As estações Praça Ouvidor Pardiniho e Boqueirão apresentaram leves tendências a queda com 0.05 e 0.04 respectivamente.

Neste cenário, um aumento nos níveis de ozônio em Curitiba, tal qual os registrados poderiam ser relacionados a um crescimento também do volume de dióxido de nitrogênio, emitido pela queima de combustíveis fósseis, em conjunto aos compostos orgânicos voláteis.

Esta hipótese foi descartada pelas figuras 98 e 99 aqui apresentadas que demonstraram estatisticamente uma queda nos valores deste poluente em três dos quatro pontos analisados. A necessidade do equilíbrio entre VOC's e NO<sub>2</sub> para a formação do O<sub>3</sub> descarta também a hipótese de incremento nos primeiros, que, aliás, não são mensurados, impossibilitando análises mais aprofundadas.

As análises elencadas até aqui indicam que as mudanças na dinâmica do ozônio a nível troposférico em Curitiba estão sendo fortemente influenciadas pela dinâmica atmosférica em específico a temperatura.

**FIGURA 101** – AUC - Tendência de Theilsen aplicado ao O<sub>3</sub>



Org.: Castelhana (2019).

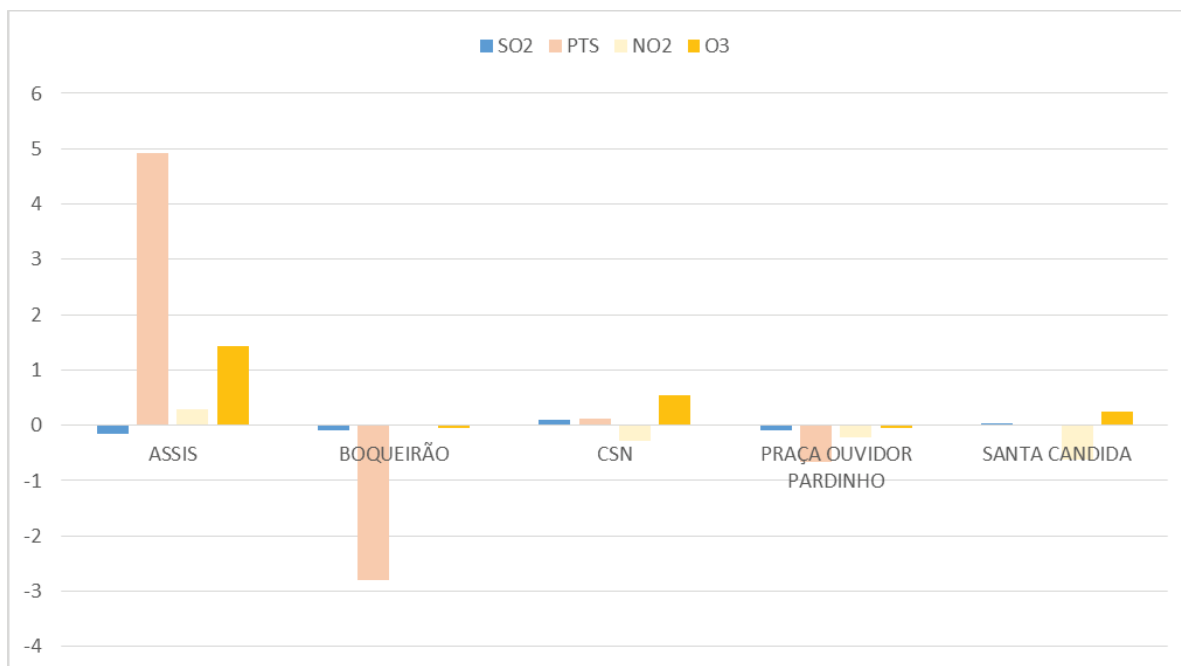
Um olhar conjunto a todos os pontos de coleta analisados, revela alguns fatos interessantes para gestores e planejadores sobre a situação de cada ponto de coleta de qualidade do ar e suas tendências estatísticas embasadas nas séries históricas aqui utilizadas.

A figura 102 revela que as estações Boqueirão e Praça Ouvidor Pardinho foram aquelas em que se observaram tendências negativas para todos os poluentes analisados.

A literatura aponta que a estação Praça Ouvidor Pardinho apresenta uma íntima relação entre a oscilação de seus poluentes com o trânsito de veículos (CASTELHANO, 2017). A distância de grandes indústrias, observada pelos modelos de dispersão do capítulo II, também aponta como principal fonte de poluição na estação Boqueirão as emissões veiculares.

A tendência a queda observada ainda não pode ser atribuída a diminuição no fluxo central em virtude das políticas de redução de velocidade, vide que, as mesmas só entraram em vigor ao final de 2015, último ano com série de dados analisados.



**FIGURA 102** – AUC - Tendências de Theilsen nas Estações analisadas.

Org.: Castelhana (2019).

A estação Santa Cândida chamou a atenção pela tendência ao crescimento no poluente O<sub>3</sub>, único com tal tendência neste ponto que apresentou os menores valores médios, dado sua localização em região residencial de baixa densidade e distante de indústrias e do centro.

As estações CSN e Assis, ambas na região industrial de Araucária, foram as que apresentaram maiores tendências a aumento nos poluentes como um todo. No caso de Assis, o único poluente que apresentou tendência a queda foi o SO<sub>2</sub>, já na CSN, a queda se pronunciou sob o dióxido de nitrogênio.

Os demais compostos analisados nesta cidade tiveram tendências ao crescimento, com destaque para o PTS em Assis e O<sub>3</sub> na estação CSN.

Dada a localização destes pontos, ressalta-se a influência das emissões industriais nestes valores, o que torna tal região a mais preocupante do AUC e a que mais deveria receber atenção do poder público, no que tange situações futuras de má qualidade do ar.

As quedas apresentadas para NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> nas regiões distantes aos centros industriais, atestam a fala de Saldiva (2012) ao mencionar o efeito dos programas de progressiva redução nos fatores de emissão dos veículos. Segundo o autor, desde o final dos 1970 estes programas obrigam as montadoras de veículos a reduzirem gradativamente os totais de emissões.

A elevação nas temperaturas, aliado ao aumento de dias anuais com temperaturas superiores a 20° C reitera o ponto levantado neste subcapítulo, quando se discutiu a tendência positiva nos níveis de ozônio na região metropolitana de Curitiba.

Mencionou-se que o ozônio se destacou como o poluente com tendências positivas na maioria das estações analisadas na área de Curitiba, em contrapartida ao decréscimo registrado no Dióxido de Nitrogênio.

Tanto as tendências dos últimos 57 anos quanto os cenários projetados pelo IPCC e PBMC em suas situações mais pessimistas e mais otimistas indicam de fato um aumento constante nas temperaturas para a região de Curitiba.

Analisando agora as tendências positivas encontradas nos índices ligados a temperatura também para a região de Curitiba pode-se compreender o aumento de O<sub>3</sub> como reflexo direto desta variabilidade no clima da cidade.

Tanto o aumento no O<sub>3</sub> quanto o aumento nas temperaturas, tornam este poluente como aquele que mais deve causar preocupações no âmbito da gestão municipal e do meio ambiente.

O observado aumento tanto na temperatura máxima, e na amplitude térmica, apontado pelos cálculos de tendência previamente demonstrados, sugerem um cenário de aumento neste poluente.

Mesmo levando em conta um cenário hipotético de estagnação no crescimento populacional urbano e por consequência nas emissões em Curitiba, o fato de a temperatura seguir aumentando possibilita que este poluente siga este ritmo.

Levando em conta apenas o clima, os demais poluentes (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e PTS) não deverão sofrer alterações. A chuva, variável que mais os afeta em termos locais tende a sofrer alterações em sua intensidade, mas não em quantidade de dias com chuva, o que, portanto, tende a mantê-los estáveis.

Tanto as tendências apresentadas neste estudo, quanto as apontadas na literatura revisada sugerem estas mudanças nos cenários de precipitação para o AUC.

Volume de chuva superiores a 2,5 mm já se mostraram suficientes para facilitar a remoção de poluentes em suspensão significativamente, a exceção do SO<sub>2</sub>.

Este último foi, dentre os poluentes analisados, o que apresentou relações mais frágil com as variáveis climáticas. Os resultados dos cálculos de tendência observados, com quedas na Praça Ouvidor Pardinho, Assis e Boqueirão, sugerem, portanto, diminuições de emissões nestas regiões.

As alterações na temperatura aliadas ao possível crescimento das ondas de calor, pode, todavia, alterar a dinâmica dos ventos conforme mencionado por Eichelberg et. al., (2008), ocasionando em ventos com velocidade média superior e, a priori, auxiliando no processo dispersão dos poluentes a nível local.

Contudo, segundo os resultados obtidos no ultimo capítulo, novamente o ozônio, foi o único poluente que demonstrou uma relação inversa com a velocidade do vento.

As maiores concentrações foram registradas em situações de ventos com velocidade média acima de 5 m/s, bem superior à média da cidade que gira abaixo de 2 m/s.

Os cenários aqui apresentados indicam, de fato, um aumento nas temperaturas para o AUC em conjunto a maiores volumes de precipitação. Os cenários traçados para os poluentes são, de maneira geral positivos, visto que, tanto NO<sub>2</sub>, quanto SO<sub>2</sub> tem apresentado quedas acentuadas em seus totais. O PTS igualmente, apresentou uma tendência negativa também na região central de Curitiba. Levando em conta que os cenários climáticos traçados não devem afetar positivamente o volume destes poluentes, a situação dos mesmos torna-se ainda mais favorável.

O ozônio por outro lado, tem nos cenários futuros traçados para temperatura, um potencial elemento que favoreça seu crescimento, algo por sua vez, já demonstrado nos cálculos de tendência para as series históricas deste composto.

A hipótese levantada no início da tese de que as mudanças climáticas em Curitiba poderiam alterar a dinâmica dos poluentes é, em partes, refutada. Observou-se que, dentro do espectro de quatro poluentes, o ozônio é o único com potencial modificação em sua formação em decorrência dos cenários climáticos que se desenharam para o AUC.

O próximo capítulo propõe-se a discutir integradamente os resultados dos três capítulos vistos até agora, visando estabelecer sugestões, medidas e alternativas que propiciem cenários positivos para a qualidade do ar no AUC.

## **CAPÍTULO V – A QUALIDADE DO AR NO AUC NA DIMENSÃO DA MESO E DA MICRO-ESCALA ESPACIAIS – CONCLUSÕES.**

Procura-se neste capítulo discutir os resultados obtidos nos capítulos anteriores de forma conjunta e relacioná-los com a literatura citada até aqui, trazendo ao final proposições e considerações sobre o problema aqui discutido.

Considerou-se que o objetivo principal desta tese foi atingindo, quando, ao se observar os resultados registrados foram reveladas complexidades do fenômeno estudado.

Se por um lado, quando se analisa a qualidade do ar sob o espectro de sua concepção mais básica, que o aponta como excesso de algum componente diferente da composição natural do ambiente analisado, remete-se, sobretudo, a um problema exclusivo da química ambiental, por outro, ao analisá-lo sistematicamente e sob o olhar da geografia, pode-se compreendê-lo como um problema também de ordem política, social, econômica e cultural.

Pode-se situar a má qualidade do ar como um fenômeno que tem sua origem geográfica nas cidades, com os primeiros casos relatados nos primeiros aglomerados das civilizações gregas e romanas antigas (FELLENBERG, 1980). Apenas após a revolução industrial no século XVIII que a poluição atmosférica gradativamente torna-se de fato um problema de saúde pública. A princípio, todavia, ainda restrita aos grandes centros urbanos do mundo capitalista ocidental como as cidades de Manchester, Londres e Paris.

A paisagem de cidades industriais do século XIX como estas era então tomada por chaminés industriais, que à época, representavam muito mais o progresso e o desenvolvimento do que a insalubridade.

Neste período não existiam registros confiáveis para discutir a má qualidade do ar no âmbito estatístico por exemplo, mas os relatos da época reforçam o imaginário popular de cidades adensadas e com espessas nuvens de poluição as cobrindo.

Regiões fora deste eixo industrial-urbano ocidental encontravam-se além dos limites deste problema. É somente com a expansão do capitalismo e a busca por mais mercado consumidor e matéria-prima, que veremos também a expansão espacial das grandes indústrias e do consumo.

Cidades nas franjas do mundo ocidental começam a mudar seus hábitos de vida e de consumo, ansiando pelo mesmo modelo dos países dominantes.

Passam-se a ver a popularização dos automóveis, e a instalação de indústrias em regiões cada vez mais distantes dos antigos grandes centros.

Esta nova dinâmica, fruto da globalização e que vem ocorrendo sobretudo no chamado período pós-moderno, torna até mesmo cidades de pequeno a médio porte como potenciais vítimas de riscos ambientais, como a má qualidade do ar, vide os casos relatados em cidades pequenas como Paulínia no interior de São Paulo ou mesmo, distantes do ocidente como os estudos da Lituânia e do Paquistão, também relatados anteriormente.

Curitiba e Araucária não fogem desta lógica. As cidades se estabelecem no cenário industrial a partir dos anos 1970 com grande concentração de indústrias na porção Sul e Sudoeste da capital, nas regiões da CIC e do CIAR. As mesmas regiões foram as quais se notou um maior espraiamento da mancha urbana da cidade, em conjunto a algumas áreas da região Norte da RMC e também onde se notou uma maior retração das áreas verdes nativas.

As antigas indústrias de Curitiba que se localizavam no bairro Rebouças, outrora região periférica, e hoje em dia próximo ao centro, se deslocam rumo às regiões menos habitadas da época, de modo que poucas foram as indústrias que se mantiveram nesta região após a criação da CIC.

Sua paisagem industrial ainda pode ser percebida, através da presença de antigos barracões e chaminés, próximos a antiga estação ferroviária, indicando que num tempo passado, a configuração espacial da cidade seguia outra lógica.

Se por um lado a mancha urbana se expandiu nesta direção, a região central e adjacências continua a ser adensada e o número de veículos na capital segue crescendo em ritmo intenso.

No caso de Curitiba a frota de carros saltou de 808.070 veículos registrados em 2003 para um total próximo a 1,35 milhões em 2013. Um crescimento de quase 77% em 10 anos. A cidade apresenta um dos mais altos índices de carros por habitante, o que certamente implica de maneira direta e indireta em sua qualidade do ar. Em 2003, a relação era 0,48 veículos por habitante de Curitiba, já em 2013 saltou para 0,77 (DENATRAN,2016).

Os efeitos destes processos foram percebidos, de maneira desigual nos dados recolhidos ao longo desta pesquisa. Constatou-se em mesoescala o



efeito das indústrias na região Sudoeste da capital paranaense assim como do centro adensado sobre os níveis dos poluentes SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e PTS.

O ozônio por outro lado, revelou-se como um composto de comportamento espaço-temporal distinto aos demais. Seus valores mais expressivos foram detectados na estação Santa Cândida, enquanto que a região com menores registros foi a da região industrial da estação CSN.

As tendências observadas no capítulo IV revelam, todavia, um crescimento deste poluente justamente no bairro Santa Cândida. A estação Assis também apresentou tendências negativas para este gás, a despeito das tendências positivas observadas na estação CSN, e deflagrada como a grande genitora de poluentes da primeira.

Reitera-se ainda, a relação próxima entre os níveis de ozônio e a elevação de temperaturas, em decorrência aos processos químicos que o formam.

Ressalta-se aqui as tendências negativas para PTS, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> nas regiões centrais de Curitiba, sobretudo a partir de 2010 e na estação Boqueirão. As estações em Araucária seguiram com sua dinâmica conjunta, ambas com tendências positivas para o PTS, de forma mais significativa na estação Assis.

Os dados e análises realizados no capítulo II permitiram o atingimento do objetivo específico II desta tese. O crescimento da região central de Curitiba e a consequente criação das zonas indústrias em suas periferias nas áreas Sul e Sudoeste que levou a mudança na dinâmica industrial da cidade, pode, por um lado ter evitado níveis ainda maiores de poluição na região central.

O planejamento a época, todavia, não previu que a mancha urbana alcançasse estas zonas, a época distante geograficamente, de maneira tão rápida e aqui encontra-se a falha ou mesmo ausência no planejamento urbano do AUC.

O desenvolvimento industrial carecia de mão-de-obra, assim, surgem ocupações e bairros residenciais, habitadas em sua maior parte por trabalhadores justamente destas indústrias. Estas ocupações crescem muitas vezes de forma ilegal, dada a falta de recurso deste trabalhador em adquirir moradias no mercado legal e tornam-se locais com pouca ou nenhuma estrutura de serviços públicos.

O crescimento da mancha urbana nesta direção se dá de forma de muito intensa, levando uma grande parcela da população a viver muito próximos dos locais em que a qualidade do ar se mostra como de alto risco, com níveis piores do que a região central, mas que, todavia, o preço da terra torna-se mais acessível.

Os modelos de dispersão gerados com base nas fontes fixas de emissão demonstram, em função da dinâmica de ventos da região de Curitiba, que as áreas industriais exercem um papel que, apesar de local, é mais intenso do que o efeito dos veículos e fontes moveis, afetando consideravelmente esta população que passou a se deslocar para esta região a partir dos anos 70, vivendo a margem da chamada capital ecológica e enfrentando graves problemas ambientais.

As simulações realizadas apontam quase ausência de poluição em toda a porção centro-Leste e Norte do AUC oriunda de fontes fixas, o que nos leva a concluir que a principal gênese deste problema nesta região está nas fontes moveis.

Apesar de, ainda com níveis muito elevados de poluição, os dados da estação central de Curitiba revelaram tendências negativas para todos os poluentes estudados. O que nos indica que, de maneira geral, o panorama nesta região é de melhora.

Conforme visto, as fontes de poluição nesta região restringem-se basicamente as emissões veiculares. Apesar do crescimento na frota de veículos, percebe-se a eficácia dos programas de controle de emissão veicular, ilustrados por estes dados.

O efeito do urbano destaca-se também nas análises temporais em escalas maiores. O menor nível de poluição generalizada nos finais de semana, e os dois picos diários de poluentes (a exceção do O<sub>3</sub>), ambos ligados ao volume de veículos, realçam o urbano como um fator determinante na dinâmica temporal dos poluentes, se sobrepondo aos fatores climáticos.

Estes fatores só reiteram o ponto defendido pela tese, de que, apenas uma análise de séries temporais não é suficiente para uma compreensão da dinâmica da qualidade do ar. A dinamicidade e complexidade deste fenômeno, tornam-no algo deverás variável, e de grande dificuldade de mapeamento.

Uma compreensão mais plena de seus processos deve, portanto, passar primeiramente por uma análise espacial do sítio analisado, de modo que, o pesquisador possa captar a dinâmica urbana/industrial e a forma como tal dinâmica se produziu.

Um problema que tem sua origem e desenvolvimento na forma como o espaço urbano se produz, com todas as suas contradições e desacordos não pode se resumir a análises pragmáticas e exatas, vide que, tais processos estão totalmente ligados ao nosso modelo de produção capitalista, aos nossos hábitos diários enquanto indivíduos, a decisões políticas e também a situações econômicas. Daí o diferencial da realização de uma abordagem geográfica para o fenômeno da qualidade do ar.

O clima surge como um fator mais importante quando a análise se dá apenas ante a oscilação anual dos poluentes, portanto sob uma escala menor.

Em relação ao objetivo específico I desta tese, que previa o detalhamento das relações entre as variáveis meteorológicas e a qualidade do ar, observou-se que as análises climáticas, mesmo as mais específicas, encontraram dificuldades em estabelecer significativas relações entre os poluentes e os fatores climáticos, algo inclusive já observado nas conclusões de Danni-Oliveira (2000). Observou-se que as relações se alternam muito a depender do poluente e da localização da fonte de coleta.

Pode-se constatar o papel de regulador e ou potencializador da qualidade do ar no AUC. As relações entre os poluentes e os componentes climáticos, de forma geral, se mostraram iguais em todas os pontos analisados do AUC, destacando que, de fato, a relação existente entre os poluentes e o clima é relativamente uniforme.

Constatou-se que, independentemente dos tipos climáticos vigentes, a oscilação espacial dos poluentes, isto é, sua variação de estação para estação, mantinha-se igual, com as estações CSN e Praça Ouvidor Pardini apresentando os maiores valores, e a estação Santa Cândida o menor, exceto para o O<sub>3</sub>. Tal fato reitera o papel de condicionante atribuído as variáveis climáticas, ao menos para os poluentes PTS, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

O NO<sub>2</sub> e o SO<sub>2</sub> mostraram-se mais afetados pela dinâmica dos ventos. O Material particulado, além dos ventos, apresentou respostas diretas a precipitação, com níveis mais baixos com chuvas acima de 2,5mm/ hora.

O SO<sub>2</sub>, dentre os compostos analisados, foi o que menos demonstrou relações com os fatores climáticos. O mesmo demonstrou pouca variação independente dos níveis de chuva. Igualmente, a temperatura também não demonstrou exercer influência sob este composto.

O NO<sub>2</sub>, em contrapartida, apresentou uma relação próxima com os valores de chuva. A precipitação também influencia significativamente os valores de PTS, sobretudo com chuvas superiores a 2,5mm diários. Mais do que os valores de precipitação, outro valor que se mostrou relacionado ao SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e PTS foram os dias consecutivos sem chuva.

A umidade relativa do ar apresentou relações mais significativas com o PTS, enquanto que, para os demais, não se revelaram relações.

O ozônio, dada a sua formação química, apresenta uma relação mais estreita com a temperatura, de modo que, pode-se tratar este fator meteorológico como um fator determinante no caso deste poluente.

Tal relação torna este gás como aquele com maior propensão a alterações em sua dinâmica em decorrência dos cenários de mudança climática que se projetam para a região de Curitiba, deflagrada no capítulo IV.

Respondendo os anseios do objetivo específico III, observou-se que as tendências ao aumento na temperatura, aliadas as constatadas tendências no aumento deste poluente reiteram a necessidade de maiores estudos acerca deste poluente e o colocam como o de maior potencial problema para os cenários que se desenham para a cidade.

Os demais poluentes, conforme já constatado, não apresentam cenários futuros, em termos climáticos, que potencializem o seu crescimento.

Procurando agora responder ao objetivo específico quatro, no âmbito da cidade de Curitiba, as ações dos gestores devem pautar-se sobretudo na redução de emissões de fontes móveis, ou seja, os carros.

Citou-se o incremento no número de veículos que a cidade apresentou nos últimos anos. Isto deveu-se em parte, a boa fase da economia brasileira e a facilidade de crédito para a compra de veículos privados. Não se fala aqui em demonizar a aquisição do carro privado, afinal, trata-se de um direito individual, todavia, poderia se discutir algumas políticas que incentivassem os cidadãos a utilizar menos os seus veículos.

Práticas como incentivo a uso de bicicletas, pedágios urbanos, redução de áreas trafegáveis são algumas das medidas que mais vindo sendo utilizadas nos grandes centros europeus.

Em conjunto a estas práticas, os gestores devem também incentivar o uso de transporte coletivo, sejam na redução de sua tarifa, popularizando esta prática e tornando-a economicamente mais viável, seja aumentando as frotas e o seu alcance, tornando esta experiência mais agradável.

Algumas situações nas regiões centrais de Curitiba, infelizmente já se encontram deverás concretada, o caso do *canyon* analisado na Avenida Marechal Deodoro e sem uma solução aparente. Em vias como esta, deve-se buscar de forma mais específica a redução do fluxo de veículos, justamente pelas dificuldades na dispersão do material aqui emitido.

O planejamento de Curitiba, que adensa verticalmente os chamados eixos estruturais contribui para a formação de regiões de potencial acúmulo de poluentes, outro ponto grave a ser repensando pelos gestores.

Nos remetendo a Oliveira (2014), o autor afirma que o planejamento inicial destes eixos estruturais não previa prédios tão próximos, o que evitaria a formação destes *canyons*. Todavia, por pressões por setor privado, o zoneamento foi revisto, possibilitando a criação de inúmeros edifícios muito próximos. Um exemplo do que seria o planejamento original encontra-se na porção final do eixo Oeste da cidade, na região denominada *Ecoville*, região está com edifícios de alto padrão intercalados por áreas verdes, e distantes uns dos outros, de modo a garantir boa circulação de ventos e passagem de radiação

Sua afirmação nos remete a teoria de Santos (1993) e Harvey (2016) que apontam o constante embate entre interesses públicos e privados no desenvolvimento das cidades, no caso dos países em desenvolvimentos, com a balança pendendo ao poder privado e trazendo consequências a estes ambientes, como as vistas nesta tese.

A eletrificação das frotas de ônibus seria outra opção interessante para os gestores, sobretudo nos eixos estruturais que contam com a passagem de veículos maiores e com mais frequência.

Um bom exemplo de uma prática que possa melhorar a condição da qualidade do ar nestas localidades foi a adequação do trecho da Avenida Sete

de Setembro do eixo estruturante Sul. Ao final de 2014 a velocidade média foi reduzida a 30 km/h para veículos privados, e ciclovias foram instaladas junto as vias.

Atualmente, esta área, extremamente verticalizada, não apresenta um trânsito tão intenso quanto suas vias paralelas, e o fluxo de bicicletas tornou-se maior, dado o fato desta via passar pela região central da cidade. Este projeto se expandiu para o eixo estrutural Norte, mas desde 2016 não foi mais levado adiante.

Políticas voltadas a arborização de vias e criação de pequenos parques urbanos também poderiam auxiliar na melhora da qualidade do ar, sobretudo melhorando a circulação de ventos.

No âmbito das regiões industriais, o poder público deve buscar evitar o crescimento urbano nas regiões próximas, propondo novas zonas que limitem o tamanho e ocupação dos lotes. Junto a isso, deve-se manter o investimento em monitoramento e fiscalização, assegurando que as emissões industriais fiquem sob controle.

Por fim, salienta-se que a melhora da qualidade do ar, envolve mais aspectos do que simples interferências pontuais na paisagem e funções urbanas. Ela envolve sobretudo novos hábitos de vida, contemplando um consumo mais consciente, desenvolvimento tecnológico, consciência política e educação.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento e desenvolvimento das cidades, consequência do intenso êxodo rural e industrialização que o Brasil passou, sobretudo após os anos 1950, tem tornado os ambientes urbanos cada vez mais problemáticos e complexos.

As primeiras revisões literárias sobre qualidade do ar realizadas nesta tese demonstraram uma predominância de abordagens físicas e pragmáticas a esta temática, oriunda das áreas de meteorologia, química e engenharia.

Mostrando-se como um tema de grande complexidade, dinamicidade e transversalidade, a proposta desta tese foi de realizar uma abordagem geográfica desta problemática no Aglomerado Urbano de Curitiba, revelando-se como um problema típico das relações desequilibradas entre sociedades e natureza.

Enquanto ciência que estuda as relações entre as sociedades e indivíduos com o espaço, a geografia se mostrava como uma ciência com grande potencial para análises no campo da qualidade do ar, o que motivou a concepção deste trabalho.

Tomando como a base as proposições metodológicas sistêmicas de Monteiro (1976) e principalmente Mendonça (2004b), elaborou-se uma proposição metodológica que buscava abarcar, compreender e situar os diversos fatores que regulam a qualidade do ar para cidades como um todo, de forma sistêmica, situados na figura do “Sistema Poluição do Ar”, proposição sob o qual esta tese se embasa.

Esta proposição pauta-se, sobretudo na diferença de peso entre os fatores temporais e espaciais na compreensão da dinâmica do problema ambiental aqui abordado. Os fatores ligados a emissão foram classificados como determinantes, enquanto as condições climáticas da cidade surgem como fatores que apenas condicionam a dispersão ou acúmulo dos poluentes.

A elaboração deste sistema pautou-se por análises introdutórias das séries históricas de dados de poluição em conjunto a dados meteorológicos. Observou-se uma baixa correlação entre os fatores climáticos e a variação nos poluentes, o que nos levou a compreender que de fato, existiam outros fatores que não o clima, que influenciavam na dinâmica temporal da poluição do ar.

O Sistema Poluição do Ar mostrou-se como uma metodologia simples e eficaz para a compreensão da complexidade e dinamicidade da qualidade do ar, podendo ser replicado em outras cidades e em diversos poluentes.

Dos poluentes analisados, apenas para o O<sub>3</sub> a metodologia não se mostrou com a mesma eficácia, em decorrência deste ser um químico considerado secundário, e que, apresenta uma ligação muito mais próxima com a oscilação de temperatura, dada sua composição e formação química.

Para o ozônio e apenas neste caso, poder-se-ia colocar as condições climáticas, em específico a temperatura, como um fator determinante para a compreensão de sua dinâmica.

Esta especificidade, aliado à sua tendência ao crescimento fazem deste poluente um ponto de destaque deste trabalho. Maiores e mais detalhados estudos, envolvendo coleta de dados em campo deste gás podem no futuro esclarecer melhor sua relação com o espaço.

A literatura aponta relação deste com áreas verdes, e indica inclusive o material particulado como um poluente que poderia inibir sua presença, o que pode explicar seus valores maiores no bairro Santa Cândida.

De igual forma, propõe-se estudos mais aprofundados, observando o seu crescimento e dinâmicas espaciais, assim como, estudos mais robustos acerca dos cenários futuros para o clima do AUC, que possam vir a ser comparados com a dinâmica do poluente, vide que, o mesmo mostrou-se como o poluente com maior potencial de crescimento em decorrência aos cenários climáticos futuros.

A realização dos cálculos e observações em escala horária tanto do clima quanto da poluição do ar, permitiram uma grande acuidade e detalhamento da relação entre estes fenômenos, mas séries maiores de dados podem garantir ainda mais qualidade para estas análises.

O fato de sua correlação não ser linear e depender sobretudo das fontes emissoras, além da fluidez e velocidade com que os valores se alteram de hora em hora e de local para local, tornaram a metodologia da análise rítmica como a não mais adequada para a observação da relação entre os componentes.

A análise rítmica consegue realizar uma análise conjunta dos fatores meteorológicos, analisando o clima como um todo, sendo este o seu diferencial, mas as análises aqui apresentadas apontam que a frágil relação

entre o clima e a poluição do ar se dá, sobretudo em variáveis isoladas e específicas, como os ventos e a chuva.

Além disso, a análise rítmica em escala diária prejudica uma análise mais detalhada das oscilações climáticas e dos poluentes, tornando a inter-relação entre os dois ainda menor. Os poluentes apresentam oscilações muito intensas, e análises em escala diária, através de valores médios acabam por mascarar estas nuances.

Há de se levar em conta também a qualidade dos dados utilizados. As séries de poluição apresentaram alta quantidade de quebras e falhas. Segundo informado pelo órgão responsável, os custos para manutenção de uma estação são elevados, o que muitas vezes as deixa por meses sem operação, em consequência da falta de verbas.

Junto a estas falhas, pequenos problemas também prejudicam as análises. Um exemplo encontra-se na estação REPAR. Inicialmente esta estação seria utilizada como a representativa da região industrial de Araucária, todavia, uma análise introdutória revelou que a partir de um determinado período, os valores de qualidade do ar desta estação caíram vertiginosamente.

Por outro lado, a estação CSN, muito próxima a esta, manteve-se com valores muito altos, gerando desconfiância. Posteriormente revelou-se que a estação REPAR havia sido mudada de local, indo para um lugar mais distante do centro industrial e a uma direção favorável do vento. Esta alteração não havia sido informada nos boletins oficiais e acabou por prejudicar a série histórica por inteiro.

Igualmente ao longo dos últimos cinco anos duas estações em locais estratégicos também foram desativadas por falta de recursos. A estação Santa Casa, localizada junto à praça Rui Barbosa e uma das regiões mais adensadas e de intenso trânsito da capital, e a estação Colombo, localizada na sede do município vizinho ao Norte de Curitiba.

Esta segunda estação, durante seu período de funcionamento, registrou os mais altos valores de PTS dentre todas as estações do AUC, inclusive dos complexos industriais de Araucária, em decorrência da atividade exploradora de calcário que existe na região Norte de Curitiba.

Os valores aqui captados registravam o impacto ambiental desta atividade tão comum na área. Após o seu cancelamento, não existem mais registros ou

dados que nos permitam monitorar e fiscalizar a região, expondo uma grande parte da população a riscos de saúde graves.

Igualmente, tecem-se críticas também aos modelos de dispersão aqui gerados. Sua base de dados, conforme explanada, são os inventários de emissão do IAP, a nível de estado e da Secretária Municipal de Meio Ambiente a nível de Curitiba.

Remetendo-nos aos mapas citados, percebe-se que tanto os modelos, quanto o mapa 14 indicam ausência de poluição e quase nenhuma indústria na região Norte do AUC. Os dados disponíveis até o cancelamento da estação Colombo indicavam ali a presença dos mais altos níveis de poluição por material particulado, mas os dados do modelo, por sua vez indicam o oposto.

Isto pode ser fruto da política de auto monitoramento também já mencionada, que delega a própria indústria o papel de monitorar o amonte de emissões que a própria gera, em claro caso de conflito de interesse.

Alia-se a este fato a falta de verba para fiscalização e passa-se então a ter dúvidas quanto a proximidade do modelo com a realidade, por mais que tenha sido embasado por dados oficiais.

Observando tais fatos, propõe-se estudos com maior nível de detalhe especificamente para esta região Norte do Aglomerado Urbano de Curitiba, a qual tem no calcário a base de sua economia. O monitoramento em municípios como Colombo, Almirante Tamandaré, Rio Branco do Sul, Itaperuçu, Bocaiuva do Sul, entre outros é de fundamental importância, assim como estudos geográficos mais específicos nestas áreas.

Por fim, evidencia-se que a elaboração do presente trabalho, além de cumprir com seus objetivos iniciais e responder as perguntas propostas, abre mais campos de pesquisa e questionamento de significativa relevância no cenário nacional, dando margem a novas possibilidades de pesquisa para o futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKPINAR E., AKPINAR S., OZTOP H. **Statistical analysis of meteorological factors and air pollution at winter months in Elaziğ, Turkey**. Journal of Urban and Environmental Engineering, Vol. 3, N.1, p. 07-16, 2009
- ALBERTA ENVIROMMENT. **Sulphur Dioxide: Environmental Effects, Fate and Behaviour**, Alberta Enviromment, 2003.
- ANCELET, T., DAVY, P.K., TROMPETTER, W.J., **Particulate matter sources and long-term trends in a small New Zealand city**, Atmospheric Pollution Research v.6, p. 1105 - 1112, 2015
- ANDRADE, H. **A Qualidade do Ar em Lisboa, Valores Médios e Situações Extremas**, Finisterra, v.31, n. 61, p. 43-66, 1996
- ANDRADE, M.D. MIRANDA, R.M., FORNARO, A., KERR, A., OYAMA, B., ANDRE, P.A. e SALDIVA, P., **Vehicle emissions and PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in six Brazilian cities**, Air Quality, Atmosphere and Health, v.5, n.1, p.79-88, 2012
- AWAN, M.A, AHMED, S.H., ASLAM, M.R. e QAZI, I.A., **Determination of Total Suspended Particulate Matter and Heavy Metals in Ambient Air of Four Cities of Pakistan**, Iranica Journal of Energy and Environment, V. 2, p. 128-132, BabolNoshirvani University of Technology, 2011.
- BAIRD, C. **Química Ambiental**, 2.ed. Bookman, Porto Alegre, 2002.
- BELL, M.L., DAVIS, D.L., FLETCHER, T., **A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952: the role of influenza and pollution**, Environmental Health Perspective, 112, 1, p.6-8, 2004
- BELUSIC,A., HERCEG-BULIC,I. e KLAIC,Z.B., **Using a generalized additive model to quantify the influence of local meteorology on air quality in Zagreb**, Geofizika, V.32, P. 47-77, 2015
- BENDER, A. P. e DZIEDZIC, M. **Dispersão de Poluentes nos eixos estruturais em Curitiba (PR), Brasil**, ABES. Engenharia Sanitária Ambiental, v.19, Edição Especial 31-42, 2014
- BIGI, A., e GHERMANDI, G., **Long -term trend and variability of atmospheric PM<sub>10</sub> Concentration in the Po Valley**, Atmospheric Chemistry and Physics, v.14, p. 4895 -4907, 2014
- BRANCO, S.M e MURGEL, E. **Poluição do Ar**, Editora Moderna, 2ª Ed. São Paulo, 2004.

BRIGGS,D.J., COLLINS,S., ELLIOTT,P. FISCHER, P. KINGHAM,S., LEBRET,E.  
PRYL,K. , REEUWIJK,H.V., **Mapping urban air pollution using GIS: a regression-  
based approach**, International Journal of Geographical Information Science, V. 11,n.  
7,p. 699-718, 1997

BRIMBLECOMBE, P. **Attitudes and Responses**





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA -  
40001016035P1

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **FRANCISCO JABLINSKI CASTELHANO**, intitulada: **QUALIDADE DO AR NO AUC (AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA/PR) - CONFIGURAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NO ÂMBITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de Doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao plene atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 22 de Março de 2019.

  
FRANCISCO DE ASSIS MENDONÇA  
Presidente da Banca Examinadora

  
HARRY ALBERTO BOLLMANN  
Avaliador Externo (PUC/PR)

  
HUGO ROMERO  
Avaliador Interno (UAC)

  
ERIKA PEREIRA FELIX  
Avaliador Externo (UTFPR)

  
CHARLES APARECIDO DA SILVA  
Avaliador Externo (UFGD)

towards Air Pollution in Medieval England, Journal of the Air Pollution Control Association, 26:10, 941-945, 1976

BROECKER, W.S, Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?, Science, New Series, V. 189, N. 4201, p. 460-463, 1975

CAMPONOGARA, S. RAMOS, F.R.S e KIRCHOF, A.L.C **Reflexões sobre o conceito de Natureza: Aportes Teórico-Filosóficos**, Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, UFRGS, v 18, p. 482-500, jan/2007.

CARSLAW,D.C e BEEVERS,S.D., **Characterising and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering**, Environmental Modelling & Software V.40,p.325 a 329, 2013

CARSLAW, D.C. e ROPKINS, K., **Openair — an R package for air quality data analysis**. Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, 52-61, 2012

CARVALHO, A. C.; CARVALHO, A., MONTEIRO, A., SOUTO-GONZALES, J.A., **Air Quality Study over the Atlantic Coast of Iberian PeninSula**, In: Air Pollution Modelling and its Application XV, Eds Carlos Borrego and Guy Schayes, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York, pp.59-66, 2001

CARVALHO, V.S.B., FREITAS, E.D., MARTINS, L.D., MARTINS, J.A., MAZZOLI, C.R., ANDRADE, M.F., **Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a reSult of emission control policies**, Environmental Science Policy,N 47,P. 68 a 79, 2015.

CASTELHANO, F. J.; DUMKE, E. S.; MENDONCA, F. A. . **Qualidade do Ar em Curitiba e RMC: Diagnostico e Configuração Espacial**. In: Congresso Iberoamericano de Estudos Territoriais e Ambientais, São Paulo. Anais do VI CIETA, 2014. p. 2864-2885,2014

CASTELHANO, F. J. **A Qualidade do Ar no Âmbito da Climatologia Geográfica Brasileira: Considerações Sobre o Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**. In: XII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Goiânia. Anais do XII SBCG. Goiania: UFG, 2016. v. 1. p. 32-38,2016.

CASTELHANO, F. J. **Considerações Acerca da Poluição do Ar e Circulação de Veículos na Região Central de Curitiba/PR**, Geografia (Londrina), v.26, n.12, p.116-127,2017

CASTELHANO, F. J. e ROSEGHINI, W. F. F. **Caracteri-zação da dinâmica dos ventos em Curitiba-PR**. Geousp – Espaço e Tempo, v. 22, n. 1, p. 227-240, 2018.

CETESB, **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do ar no estado de São Paulo 2014, 2015**, Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>, Acessado em 26/06/2016.

CHOW,J.C. WATSON, J.G FUJITA,E.M LU,Z. LAWSON, D.R, **Temporal and Spatial Variations of PM2.5 and PM10 Aerosol in the Southern California Air Quality**

**Study**, Atmospheric Environment V.28, Issue 12, P. 2061-2080 Julho, 1994.

CONCEIÇÃO, G.M.S., SALDIVA, P.H.N. e SINGER, J.M, **Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbi-mortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo**, Revista Brasileira de Epidemiologia, V.4, N.3, P. 206-219, 2001

CORREA, R.L, **O Espaço Urbano**, Editora Ática, 3a. edição, São Paulo, 1995.

CZERNECKI,B. POLROLNICZAK,M., KOLENDOWICZ, L., MAROSZ,M. KENDZIERSKI, S e PILGUJ,N., **Influence of the Atmospheric Conditions on PM10 Concentrations in Poznan, Poland**, Journal of Atmospheric Chemistry, V. 74, p. 115-139, 2017

DANNI-OLIVEIRA, I.M, **A cidade de Curitiba e a Poluição do ar**, Tese de doutorado, USP, 2000

DENATRAN, **Frota de veículos por Tipo e Município**, 2017, disponível em: <  
<http://www.detran.pr.gov.br/modules/catasg/servicosdetalhes.php?tema=detran&id=469>>, acessado em: 10 nov.2016

DESCHAMPS, M.V., **Vulnerabilidade socioambiental na Região Metropolitana de Curitiba**, Tese de Doutorado, UFPR, 2004

DERISIO, J.C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**, Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

DOMINICI, F. MCDERMONTT,A. ZEGER, S.L. e SAMET,J.M., **On the Use of Generalized Additive Models in Time-Series Studies of Air Pollution and Health**, American Journal of Epidemiology,V. 156, n. 3, p. 193-203, 2002

DUBREUIL, V; FANTE, K.P; PLANCHON, O; SANT'ANNA NETO, J.L . **Climate change evidence in brazil from Koppen's climate annual types frequency**. International Journal Of Climatology, v. 1, p. 1-14, 2018

DUMKE, E.M.S, **Clima urbano/conforto térmico e condições de vida na cidade : uma perspectiva a partir do aglomerado urbano da Região Metropolitana de Curitiba (AU-RMC)**, Tese de Doutorado, UFPR, 2007

EEA, **Every Breath we Take – Improving Air Quality in Europe**, European Environmental Agency, Copenhagen, 2013

EICHELBERGER, S., MCCA, J., NIJSSEN, B. e WOOD, A. **Climate Change Effects On Wind Speed**. North American, Windpower, 2008 Disponível em: [WWW.nawindpower.com](http://WWW.nawindpower.com). Acessado em: 03/12/2018

EPA, **Improving Air Quality Through Land Use Activities**, EPA's Transportation Air Quality Center, Washington D.C, 2001

ESTEVES, G.R.T.; BARBOSA, S. R. C. S.; SILVA, E. P. e ARAUJO, P. D. **Estimativa dos efeitos da Poluição Atmosférica sobre a Saúde Humana: algumas possibilidades metodológicas e teóricas para a cidade de São Paulo**, II Encontro da ANPPAS, Indaiatuba -Brasil, 01-20, 2004

FANIZZA,C.,INCORONATO, F., BAIGUERA, S., SCHIRO,R., BROCCO,D., **Volatile organic compound levels at one site in Rome urban air**, Atmospheric Pollution Research, Volume 5, N. 2,P 303-314, 2014

FELLENBERG, G. **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**. Editora EPU, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1980.

FERNÁNDEZ, R. **La ciudad verde. Teoría de la Gestión Ambiental Urbana**, Buenos Aires: Editorial Espacio, CIAM, 2000a.

\_\_\_\_\_, **Gestión ambiental de ciudades: Teoría crítica y aportes metodológicos**. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental, 2000b.

FILELLA, I. e PEÑUELAS, J., **Daily, weekly and seasonal relationships among VOCs, NOx and O3 in a semi-urban area near Barcelona**, Journal of Atmospheric Chemistry, V. 54, N. 2, p. 189-201, 2006.

FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**, 12th edition. New York, Hafner, 1954.

FIRKOWSKI,O.L.C.F, Considerações sobre o grau de integração da Região Metropolitana de Curitiba na economia internacional e seus efeitos nas transformações socioespaciais, in: MOURA,R. e FIRKOWSKI,O.L.C.F **Dinâmicas Intrametropolitanas e Produção do Espaço na Região Metropolitana de Curitiba**, Observatório das Metrôpoles, Letra Capital Editora, Rio de Janeiro, 2009

\_\_\_\_\_, **Industrialização e Ação do Estado: Considerações sobre a Região Metropolitana de Curitiba (PR)**, Ra'ega, V.1, p. 119-131, 1997

\_\_\_\_\_, **A nova lógica de localização industrial no aglomerado metropolitano de Curitiba**, Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, IPARDES, n. 103, p. 79-100, 2002.

FLETCHER, R.D., **The Donora Smog Disaster - A Problem in Atmospheric Pollution**, Journal Weatherwise, v.2, n.3, p.56-60, 1949

FOX, J. e WEISBERG, S, **An R Companion to Applied Regression**, 2 Edição, Sage,

2011.

GALATIOTO, F., BELL, M.C., HILL, G., **Understanding the characteristics of the microenvironments in urban street canyons through analysis of pollution measured using a novel pervasive sensor array**, Environmental Monitoring Assessment, v.186, p. 7443-7460, 2014

GALVÃO, R.F.P. **Expansão Urbana e Proteção Ambiental em Metrôpoles Brasileiras, 1980-2010**, Dissertação de Mestrado, USP, 2011.

GIDHAGEN, L. BENNET, C. e KRECL, P. **Emissions and impact on air quality of PM and BC in Sapiranga, Rio Grande do Sul - field campaign and model assessment 2014**, Relatório de Pesquisa, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Suécia, 2015.

GIVONI, B., **Impact of planted areas on urban environmental quality: a review**. Atmospheric Environment, Oxford, v.25B, n.3, p.289-199, 1991

GRAZULEVICIENE R, MAROZIENE L, DULSKIENE V, MALINAUSKIENE V, AZARAVICIENE A, LAURINAVICIENE D, JANKAUSKIENE K, **Exposure to urban nitrogen dioxide pollution and the risk of myocardial infarction**, Scandinavian Journal of Work, Environmental and Health, v.30, n.4, p.293-298, 2004

GUERRA, E.C. **Questão Urbana e Ambiental em Tempos de Crise do Capital: Configurações e Particularidades do Brasil Contemporâneo**, Revista de Políticas Públicas, São Luis, Número Especial, p. 257-267, 2014

GUNIA, G., TSKVITINIDZE, Z., KHOLMATJANOV, B., FATKHULLAEVA, Z., **Influence of Foehn Phenomena on the Processes of Atmospheric Air Pollution**, Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, v.2, n.3, 65-69, 2008

GUTJAHR, M. R. **A Poluição do Ar em Paulínia (SP): Uma análise histórico-geográfica do clima**, Tese de Doutorado, USP, 2002

HANNA, S. R., BRIGGS, G. A. e HOSKER JR, R. P. **Handbook on Atmospheric Diffusion**, Technical Information Center, U. S. Department of Energy, 1982

HARVEY, D. **17 Contradições e o fim do capitalismo**. São Paulo: Boitempo, 2016

HATZAKIS, A. KATSOUYANNI, K. KALANDIDI, A. DAY, N. e TRICHOPOULOS, D. **Short-Term Effects of Air Pollution on Mortality in Athens**, International Journal of Epidemiology, v.15, n.1, p. 73-81, 1986

HUFTY, A, **Introduction a lá Climatologie – Le rayonnement et la temperature, L’atmosphere, L’eau, Le Climat et L’activité Humaine**, Laval, Le Presses de L’université Laval, 2001

IAP, **Relatório Anual da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba Ano de 2013**, Curitiba, 2013

\_\_\_\_, **Inventário Estadual De Emissões Atmosféricas De Poluentes (Mp, Co, Nox, Sox) E Proposta Para Revisão E Ampliação Da Rede De Monitoramento Da Qualidade Do Ar Do Estado Do Paraná**, IAP, Curitiba, 2013

IBGE, **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 maio. 2016.

INMET, **Dados Meteorológicos de Curitiba (1975-2015)**, INMET, 2019

INPE, **Caracterização do Clima no Século XX e Cenários no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos de Clima do IPCC**, CPTEC-INPE, São Paulo, 2007

IPCC, **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp, 2014.

IPPUC, **Revisão do Plano Diretor retoma tradição de planejamento de longo prazo**, Curitiba, 2015, Disponível em: <http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/revisao-do-plano-diretor-retoma-tradicao-de-planejamento-de-longo-prazo/35757>, Acesso em: Março de 2018.

\_\_\_\_, **Modelo de tráfego de veículos do Município de Curitiba**, IPPUC, Curitiba, 2016

ITCG, **Geomorfologia – Estado do Paraná**, 2008, Disponível em: [http://www.itcg.pr.gov.br/arquivos/File/Produtos\\_DGEO/Mapas\\_ITCG/PDF/Mapa\\_Geo\\_morfologico\\_A3.pdf](http://www.itcg.pr.gov.br/arquivos/File/Produtos_DGEO/Mapas_ITCG/PDF/Mapa_Geo_morfologico_A3.pdf), Acesso em fev.2018.

KAMPA, M. e CASTANAS, E, **Human health effects of air pollution**, Environmental Pollution, V.151, n.2, p.362-367, 2008.



- KARTAL,S. e OZER, U. **Determination and Parameterization of Some Air Pollutants as a Function of Meteorological Parameters in Kayseri, Turkey**, Journal of the Air & Waste Management Association, v. 48, p. 853-859, 1998.
- KEGGENHOFF, I., ELIZBARASHVILI, M., AMIRI-FARAHANI, A., KING, L. **Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971–2010**, Weather and Climate Extremes, V.4, p. 75-85, 2014
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4<sup>a</sup> ed., London: Charles Griffin, 1975
- KISHCHA, P., STAROBINETS, B., SAVIR, A. M ALPERT, P., KAPLAN, M., **Foehn-induced effects on local dust pollution, frontal clouds and solar radiation in the Dead Sea valley**, Meteorology and Atmospheric Physics, v. 130, n.12, 2017
- KLEINMAN,L.I.,DAUM,P.H.,IMRE,D., LEE,Y.N, NUNNERMACKER,L.J., SPRINGSTON,S.R., WEINSTEIN-LLOYD,J. RUDOLPH,J., **Ozone production rate and hydrocarbon reactivity in 5 urban areas: A cause of high ozone concentration in Houston**, Geophysical Research Letters,v.29,n.10, p.105-108,2002
- KRUGER, E. e ROSSI, F., **Quantificação da Ilha de Calor de Curitiba Considerando Aspectos de Estabilidade Atmosférica**, Revista Brasileira de Meteorologia, v.30, n.4, p. 394-404, 2015
- KUMAR,P. ANDRADE, M.F, YNOUE, R.Y, FORNARO,A., FREITAS, E.D., MARTINS,J. MARTINS, L.D., ALBUQUERQUE,T. e ZHANG, Y., **New directions: From biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of São Paulo**, Atmospheric Environment, V.140, p. 364-369, 2016.
- LANDSBERG, H., **The Urban Climate**, Nova York, Academic Press,1981
- LEFEBVRE, H. **A revolução urbana**. Belo Horizonte: Ed.UFMG, 1999.
- LI, X., XIA,X., WANG,L., CAI,R., ZHAO,L., FENG,Z., REN,Q., ZHAO,K., **The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres,v. 120, 11, 5371-5384, 2015
- LIMA, L. P., **Modelos Aditivos Generalizados: aplicação a um estudo epidemiológico ambiental**, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2001
- LIPPMANN, M., **Health Effects Of Ozone: A Critical Review**, Journal of the Air and Waste Management Association,V. 39, n.5, p. 672-695, 1989
- LOUREIRO, C.F.B., **O Movimento Ambientalista e o Pensamento Crítico – Uma Abordagem Política**, 2 Edição, Ed. Quartet, Rio de Janeiro, 2006
- MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**, 4<sup>a</sup> edição, Ed. UEPG, Ponta

Grossa, 2012.

MANN, H. B. **Nonparametric tests against trend**. *Econometrica*, vol. 13, n. 3, p. 245-259 p. The Econometric Society, 1945

MARCONI, M.A e LAKATOS, E.V, **Fundamentos da Metodologia Científica**, Editora Atlas, São Paulo, 1985.

MARENGO, J. **O futuro clima do Brasil**. *Revista USP*, (103), 25-32, 2014

MARGULIS, S.e DUBEUX, C.B.S. **Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades**, São Paulo, IBEP, 2010

MARTINS, E. M, FORTES, J. D. N. e LESSA, R. A., **Modelagem de Dispersão de Poluentes Atmosféricos: Avaliação de Modelos de Dispersão de Poluentes Emitidos por Veículos**, *Revista Internacional de Ciências*, v.5, n.1, p. 2-19, 2015

MAYER, H., **Air pollution in cities**, *Atmospheric Environment*, v. 33 p. 4029-4037, 1999

MCCORMAC, B. M., **Introduction to the Scientific Study of Atmospheric Pollution**, D. Reidel Publisinhg Company, 1971

MENDONÇA, F.de A. **Geografia e Meio Ambiente**, Editora Contexto, São Paulo, 1993.

\_\_\_\_\_, **O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: Proposição metodológica e sua aplicação à cidade de Londrina/PR**, Ano de obtenção, Tese de Doutorado, USP, 1994.

\_\_\_\_\_, **Geografia Física: Ciencia Humana?** SAO PAULO: CONTEXTO, 1998.

\_\_\_\_\_, **Geografia Socioambiental**, *Revista Terra Livre*, n.16, p.139-158, São Paulo, 2001

\_\_\_\_\_, **Riscos, vulnerabilidade e abordagem socioambiental urbana: uma reflexão a partir da RMC e de Curitiba**, *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, n. 10, p. 139-148, 2004a

\_\_\_\_\_. S.A.U. - Sistema Socioambiental Urbano: uma abordagem dos problemas socioambientais da cidade. In: **Impactos socioambientais urbanos**.

Curitiba: UFPR, 2004b.

\_\_\_\_\_. Mudanças Climáticas e Aquecimento Global, In: MENDONÇA, F.A., **Os Climas do Sul: Em tempos de Mudanças Climáticas Globais**, Jundiaí,

Paco Editorial, 2012

MENDONÇA, F. e DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Clima: Noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MICROSOFT, **Excel 2016**, Microsoft Corporation, 2016, Conjunto de Programas, CD-ROM.

MILLS, G., **Micro- and mesoclimatology. Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, 33(5), 711–717, 2009

MONTEIRO, A **Contribuição para o Estudo da Degradação da Qualidade do ar na Cidade do Porto**, Revista da Faculdade de Letras-geografia, v.5, p. 5-31, 1989

MONTEIRO, C.A.F. **Análise Rítmica em Climatologia**, USP, São Paulo, 1971

\_\_\_\_\_. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IGEO/USP, 1976.

MOREIRA, D. e TIRABASSI, T., **Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na : Um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental**, Revista Ambiente & Sociedade, vol.7, n.2, p. 159-173,2004

MOREIRA, J.G.V., NAGHETTINI,M., **Detecting Monotonous Time Trends as Related to Type I and Type II Errors: Case Study in Annual Maximum Daily Precipitation Series Observed in the State of Acre**, Revista Brasileira de Meteorologia, v.31, n.4, p.394-402, 2016

MUNIR, S.; CHEN, H. AND ROPKINS, K.,**Quantifying temporal trends in ground level ozone concentration in the UK**. Sci. Total Environ. 458–460: 217–227, 2013

NASCIMENTO, L.F.C, PEREIRA, L.A.A., BRAGA, A.L.F, MODOLO, M.C.C e CARVALHO JUNIOR, J.A,**Efeitos da poluição atmosférica na saúde infantil em São José dos Campos, SP**, Revista de Saúde Publica, v. 40, n.1, p. 77-82. 2006

NASS, D.P, **O Conceito de Poluição**, Revista Eletrônica de Ciências, UFSCAR, n.13, p.1, 2002

NOGAROLI, M. e MENDONÇA, F. A, **Mudanças Climáticas Globais e Variabilidade Climática no Estado do Paraná**, In: MENDONÇA, F.A., **Os Climas do Sul: Em tempos de Mudanças Climáticas Globais**, Jundiaí, Paco Editorial, 2012

OKE, T.R., **Boundary Layer Climates**, London, Mathuen & Co., 1978

\_\_\_\_\_, **Street Design and Urban Canopy Layer Climate**, Energy and Buildings, v. 11, p.103 – 113, 1988

\_\_\_\_\_, **Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological**

**Observations At Urban Sites**, WMO, 2006

OLIVEIRA, D. **Curitiba e o Mito da cidade Modelo**, Curitiba, Editora UFPR, 2014

OLSTRUP,H., FORSBERG,B., ORRU,H., **Trends in Air Pollution and Health Impacts in Three Swedish Cities Over the Past Three Decades**, Atmospheric Chemistry and Physics, v.18, n.21, p. 15705-15723, 2018

OMS, **Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease**, 2016, Disponível em: <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>, Acessado em nov-2017

PARRA. M.A.,GONZALES, L., ELUSTONDO, J. GARRIGO, R. BERMEJO, J.M. SANTAMARIA **Spatial and temporal trends of volatile organic compounds (VOC) in a rural area of Northern Spain**, Science of the Total Environment, 370 (2006), pp. 157-167, 2006

PASQUILL, F. **The estimation of the dispersion of wind-borne materials**. Meteorological Magazine, v. 90, n. 1063: p. 33-49, 1961

PBMC, **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2014

PEARCEJ.L., BERINGER,J. NICHOLLS, N., HYNDMAN,R.J., TAPER, N.J., **Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models**, Atmospheric Environment, v.45, p. 1328-1336, 2011

PEDRO,A.N.V., **Poluentes Atmosféricos e Plantas Bioindicadoras**, Instituto de Botânica, Jardim Botânico de São Paulo, São Paulo, 2007

PEKKANEN, J. Ecology: A cause becomes a Mass movement. **LIFE Magazine**, Nova York, V. 68, N.3, p. 22-31, Jan. 1970

PENG, R.D., DOMINICI,F. e LOUIS, T.A., **Model choice in time series studies of air pollution and mortality**, Journal of the Royal Statistics Society, V. 169, Parte 2, P.179-203, 2006

PEREIRA JÚNIOR, J. S. **Legislação brasileira sobre poluição do ar**. 2007. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br>>. Acesso em: dez 2018

PETERSON,T.C., FOLLAND,C., GRUZA,G., HOGG,W., MOKSSIT, A.PLUMMER,N., **Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs**, ETCCDI, 2001

PHILIPPE, C., **Analyse de la pollution atmospherique aux echelles locale et regionale. Modelisation spatiale et temporelle a l'aide d'une methode de scenarii episodiques.** Tese de Doutorado, L'institut National des Sciences Appliquees de Rouen, 2004

PINHEIRO, G. M. **Variabilidade Temporo-Espacial da Pluviosidade da Bacia do Alto Iguaçu,** Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, 2016

PNUD-UNOPS, **Proyectos de las Naciones Unidas, Proyecto Regional de Capacitacion en Gestion Ambiental Urbana,**In: Guia Metodologica de Capacitacion en Gestion Ambiental Urbana para Universidades de America Latina y el Caribe, Nova York, UNDP-UNOPS, 1997

POLLI, S. A. **Curitiba, Metrópole Corporativa: Fronteiras da Desigualdade,** Anais do XII Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional, Belém, 2007

RALL, D.P., **Review of the Health Effects Of Sulfur Oxides,** Environmental Health Perspectives. Vol. 8, pp. 97-121, 1974

RAZAVI, T. SWITZMAN, H. ARAIN,A. COULIBALY, P., **Regional climate change trends and uncertainty analysis using extreme indices: A case study of Hamilton, Canada,** Climate Risk Management, v.13, p. 43-63, 2016

R DEVELOPMENT CORE TEAM, **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2009, URL <http://www.R-project.org>.

RIBEIRO, M.A., **A Crise Ambiental Urbana Brasileira,** Revista Administração Pública, Rio de Janeiro, V. 26, n.4, p. 52-80, 1993

RIERA, P. **Evaluación de impacto ambiental,** Editorial Rubes, Barcelona, 2000

RODRIGUES, N.L, PINHEIRO, G.B e MENDONÇA, F.A, **Clima Urbano No Brasil: Análise E Contribuição Da Metodologia De Carlos Augusto De Figueiredo Monteiro,** Revista GeoNorte, Edição Especial 2, V.2, N.5, p.626 – 638, 2012.

ROMERO,H. IHL,M., RIVERA,A. ZALAZAR,P. e AZOCAR,P. **Rapid Urban Growth, Land-use Changes and Air Pollution in Santiago, Chile, Atmospheric Environment,** Vol. 33, 1999.

ROSS, J.L.S., **Análises e Sínteses na Abordagem Geográfica da Pesquisa para o Planejamento Ambiental,** Revista Do Departamento De Geografia, 9, 65-75, 2011

SALDIVA, P., **Poluição Atmosférica e Imobilidade,** In: Vida Urbana e Saúde, SALDIVA, P. Editora Contexto, São Paulo, 2012.

- SALVO, A. e GEIGER, F.M., **Reduction in local ozone levels in urban Sao Paulo due to a shift from ethanol to gasoline use**. Natural Geoscience, V 7, 450 a 458, 2014
- SANTANA, E. CUNHA, K.B, FERREIRA, A.L. e ZAMBONI, A. **Padrões de qualidade do ar: Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia**, Instituto de Energia e Meio Ambiente, São Paulo, 2012
- SANTOS, L.K.S, **Reestruturação Urbana e Conforto Térmico em Curitiba/PR: Diagnóstico, Modelagem e Cenários**, Tese de Doutorado, UFPR, 2014
- SANTOS, M. **A Urbanização Brasileira**, Edusp, São Paulo, 1993
- SCHIRMER, W.N.; LISBOA, H.M. **Química da Troposfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações**. Tecnológica Santa Cruz do Sul, v. 12 n. 2, p. 37-46, 2008.
- Schlager H., Grewe V., Roiger A., **Chemical Composition of the Atmosphere**. In: Schumann U. (eds) Atmospheric Physics. Research Topics in Aerospace. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012
- SEINFELD, J.e PANDIS, S., **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change**, Wiley-interscience, 2006
- SILVA, M.N. da. **Indústria e Produção do Espaço Urbano em Araucária**, RA EGA, ano 12, n. 12. p. 73-91, 2006
- SILVA, M.N. da. **Produção Dos Espaços Informais De Moradia Na Metrópole De Curitiba**, Mercator (Fortaleza) vol.13 no.1, 2014
- SILVEIRA, F.L, A Filosofia De Karl Popper e suas Implicações no Ensino da Ciência, In: Oliveira, P. E. **Ensaio sobre o Pensamento de Karl Popper**, Circulo de Estudos Bandeirantes/PUC-PR, Curitiba, 2012.
- SIMONS, G. **Praderas y Tundras**. Editoria Planeta, Madrid, 1988.
- SINI, J.F. ANQUETIN, S. e MESTAYER, P.G., **Pollutant Dispersion and Thermal Effects in Urban Street Canyons**, Atmospheric Environment Vol. 30, No. 15, pp. 2659-2677, 1996
- SMHI, **Airviro's User's reference Vol II: Working with the Dispersion Module**, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2015. Disponível em: [http://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.98389!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/UserRef\\_Volume2\\_Dispersion\\_v4.00.pdf](http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.98389!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/UserRef_Volume2_Dispersion_v4.00.pdf), Acessado em: 19/07/2017
- SMHI, **Airviro - Air Quality Management system**, Suécia, 2016, Mídia Digital, Plataforma On-line.



SMMA, **Inventário Municipal De Emissões Atmosféricas De Poluentes**, SMMA, Curitiba, 2013

SOUZA, S.L **Doenças Respiratórias em Araucária/Pr (2001 s 2003) – Condicionantes Socioambientais e Poluição Atmosférica**, Dissertação de Mestrado, UFPR, 2006

SPAGNOLO, S. **Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano. Estudio de caso: localidad de General Daniel Cerri**, Huellas, n. 15, p. 180-197, 2000.

STEG, L. **Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use**, Transportation Research Part A: Policy and Practice, V.39, p. 147-162, 2005

STRAVINSKIENÈ, V. BARTKEVICIUS, E. e PLAUSINYTÈ E. **Impact of Industrial Pollution on Scots Pine (Pinussylvestris L.) Radial Growth in the Areas of Mineral Fertilizer Factory “Achema”**, Russian Journal of Ecology, V. 45, N. 6, p. 525-531, 2014.

SULAIMAN, A., AB RAHMAN, A. A.; MAULUD, K.N.A., LATIF, M.T.; AHMAD, F.; WAHID, M.A.A.; IBRAHIM, M. A.; HALIM, N. N. D. A. **Distribution ozone concentration in Klang Valley using GIS approaches**, Journal of Physics: Conference Series, V. 852, n.1, p. 1-8, 2017

SZULECKA, A., OLENIACZ, R. e RZESZUTEK,M., **Functionality of openair package in Air Pollution Assessment and Modeling – A Case of Study of Krakow**, Environmental Protection and Natural Resources Journal, v.28, n.2 p. 22-27, 2017

TADANO, Y.S, **Análise do Impacto de Mp10 na Saúde Populacional: Estudo de caso em Araucária, Pr**, Dissertação de Mestrado, UTFPR, 2007

TOBÍAS, A. e SAEZ, M. **Time-series regression to study the short-term effects of environmental factors on health** , Document de treball, Girona (ESP), 2004.

URBS, **Sistema Trinário de Vias**, Curitiba, 2019, Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/rede-integrada-de-transporte/19>, Acesso em: 28/03/2019

VALLEDOR DE LOZOYA, A. **Paloma migratória americana, de la abundancia a la extinción**. Quercus, v. 219, p. 54-59, 2004

VIEIRA, C.H. S. D. e BIONDI, D., **Análise da dinâmica da cobertura vegetal de Curitiba, PR (de 1986 a 2004), utilizando imagens Landsat TM**. Rev. Árvore [online], vol.32, n.3,2008

VIGOTTI, M.A, ROSSI, G. BISANTI, L. ZANOBETTI, A, SCHWARTZ, J. **Short term effects of urban air pollution on respiratory health in Milan, Italy, 1980-89**, Journal of Epidemiology and Community Health, v.50, p. 71-75, 1996.

XIMENEZ, A. R., MERLI, A. G., CAMPOS, E.M., DIAS, J.V.P.P., **O Impacto Ambiental Devido A Política De Crescimento Da Frota De Veículos**, Revista Ciências do Ambiente On-Line, v.4, n.2, p.1-7, 2008

WANGENHEIM, A.V., **Análise de Agrupamentos**, Florianópolis, Junho de 2014. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/~patrec/agrupamentos.html>. Acesso em: 09 de Março de 2016.